

Einsatz von *System Dynamics* zur Modellierung des globalen Kupfersystems

Das Modell SysCu

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

im Fachbereich 09
Agrarwissenschaften, Ökotropologie und Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Isabelle Gröticke
Master of Science

Gießen 2013

Erstgutachter: Universitätsprofessor Dr. Matthias Frisch
Zweitgutachter: Universitätsprofessor Christoph Müller, PhD

Tag der Disputation: 13.12.2013

Inhalt

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Vorwort	VI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Modelle für die Beschreibung des Kupfersystems	4
1.3 Rohstoffsystem Kupfer	7
1.3.1 Das chemische Element Kupfer	7
1.3.2 Reserven, Reservebasis, Ressourcen	7
1.3.3 Kupferangebot und -nachfrage	8
1.3.4 Raffiniertes Kupfer und Kupferanwendungen	9
1.3.5 Substitutionsmöglichkeiten	12
1.3.6 Produktlebensdauer, Nutzungsdauer	13
1.3.7 Recycling	14
1.3.8 Abfallströme/Deponien	16
1.3.9 Dissipative Verluste	16
1.3.10 Bevölkerungsentwicklung	17
1.3.11 Weltwirtschaft und Pro-Kopf-Kupfer-Verbrauch	18
1.3.12 Technologischer Fortschritt	21
1.3.13 Knappheit von Kupfer und Preisentwicklung	22
1.4 Forschungsziele	24
2 Methoden	25
2.1 Grundlagen von <i>System Dynamics</i>	25
2.1.1 Begriffserklärungen	25
2.1.2 Systemtheorie und Kybernetik	28
2.1.3 Definition und Begriffsabgrenzung von <i>System Dynamics</i>	30
2.1.4 Historie von <i>System Dynamics</i>	32
2.1.5 Theoretische Grundlagen von <i>System Dynamics</i>	32

2.2 System Dynamics-Modellentwicklung	34
2.2.1 Problemspezifikation	36
2.2.2 Qualitativer Entwurf des Modells	36
2.2.3 Quantitativer Entwurf des Modells	38
2.2.4 Analyse des Modells (Validierung)	43
2.2.5 Policyentwürfe und Evaluation	44
2.3 SysCu - Implementierung eines System Dynamics-Modells für den globalen Kupfermarkt	45
2.3.1 Systemelemente	47
2.3.2 Feedback-Loops	51
2.3.3 Modellstrukturen und -gleichungen	53
3 Ergebnisse	64
3.1 Überblick über die fünf entwickelten Szenarien	64
3.2 Szenario <i>Baserun</i>	68
3.3 Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	75
3.4 Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	81
3.5 Szenario <i>Pluralismus</i>	87
3.6 Szenario <i>Balance</i>	93
4 Diskussion	98
4.1 System Dynamics zur Modellierung von Rohstoffsystemen	101
4.2 Modellanalyse und Vergleich der Szenarien	103
4.3 Rohstoffverknappung.....	111
4.4 Rohstoffsicherung durch <i>Urban Mining</i>	113
5 Schlussfolgerung und Ausblick	117
Literatur.....	119
Anhang	i
Anhang 1: Glossar	i
Anhang 2: Screenshots des Modells SysCu	iv

Anhang 3:	Quellcode des Modells SysCu	xiii
Anhang 4:	Übersicht der modellierten Parameterwerte	xxvi
Abkürzungsverzeichnis		xxvii
Abbildungsverzeichnis		xxix
Tabellenverzeichnis		xxxiii
Formelverzeichnis		xxxiv
Erklärung		xxxvi

Kurzfassung

Kupfer (Cu) ist ein Basismetall, welches im Alltag mit großer ökonomischer Bedeutung eine breite Anwendung findet. Kupfer wird aus Kupfererzen extrahiert. In den vergangenen Jahrzehnten ist die weltweite Kupfernachfrage stark angestiegen. Immer geringere Erzkonzentrationen im Ausgangsgestein gelten als abbauwürdig. Die globalen geogenen Kupfervorkommen werden zunehmend abgeschürft, so dass Kupfer immer knapper wird. Aufgrund seiner einzigartigen chemisch-physikalischen Eigenschaften ist Kupfer in vielen Produkten wie der *Energie- und Technologieübertragung*, im *Automobilsektor*, bei *stationären Motoren*, in der *Architektur* oder *Wasserinstallation* ein häufig verwendeter und essentieller Rohstoff. Kupfer gilt als sehr gut rezyklierbar und kann ohne Qualitätseinbußen wiederverwertet werden. Diese Merkmale werden derzeit im globalen Maßstab nur unzureichend genutzt. Das in dieser Arbeit entwickelte *System Dynamics*-Modell SysCu (System Kupfer) greift diesen Aspekt auf.

Ziel ist die Entwicklung eines computergestützten Modells zur Beschreibung des globalen Rohstoffsystems Kupfer. Die verwendete *System Dynamics*-Methodik ermöglicht eine ganzheitliche Analyse und Simulation komplexer und dynamischer Systeme. Durch die mathematisch-analytische Modellierung können Systemzusammenhänge abgebildet und erklärt werden. Das Systemverständnis und die Interaktionen innerhalb des Rohstoffsystems Kupfer stehen in der vorliegenden Arbeit im Fokus. Das entwickelte Modell SysCu betrachtet neben dem primären Stoffkreislauf (dem Kupferabbau geogener Minen) besonders den sekundären Stoffkreislauf. Dieser ist einerseits durch die Anteile der unterschiedlichen Kupferanwendungen charakterisiert, andererseits von deren Nutzungsdauern und Sammelquoten. In der Vergangenheit bis heute werden viele Produkte nicht oder nur in geringem Umfang recycelt; vielmehr lagern sie ungenutzt als sogenannte *Stille Reserve* beispielsweise auf Deponien.

Der globale Kupferkonsum steht im engen Zusammenhang mit der Entwicklung der Weltwirtschaft und den Bevölkerungszahlen. Diese Aspekte fließen ebenso in das Modell SysCu mit ein wie das primäre und sekundäre Kupferangebot. Durch diese umfassende globale Betrachtungsebene ist es möglich, ein simplifiziertes umfängliches Verständnis des weltweit agierenden Rohstoffsystems Kupfer zu erhalten. Mithilfe der fünf Szenarien *Baserun*, *Hohes Wachstum*, *Globale Nachhaltigkeit*, *Pluralismus* und *Balance* können zukünftige Prognosen abgebildet und Aussagen abgeleitet werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass zwischen 2045 bis 2068 die primären globalen Kupferreserven erschöpft sein werden. Die Menge an nicht verwendetem abgelagertem Kupfer aus den verschiedenen Kupferanwendungen ist hingegen erheblich. Durch die Nutzung der *Stillen Reserve* könnte eine weltweite Rohstoffsicherung von Kupfer erreicht werden. Diese Möglichkeit wird unter dem Begriff des *Urban* bzw. *Landfill Minings* subsumiert. Neben der ökonomischen Bedeutung kann der Gebrauch von sekundärem Kupfer aus Schrott einen erheblichen Beitrag zur globalen Nachhaltigkeit leisten. Durch die Verwendung sekundärer Rohstoffe werden Ressourcen wie Wasser, Luft oder Landschaft erheblich geschützt und somit können die Umweltauswirkungen minimiert werden.

Mithilfe des Modells SysCu ist es möglich, Abschätzungen bezüglich der globalen Rohstoffverknappung zu treffen und Alternativen wie eine Erhöhung der Recyclingquoten oder die Ausweitung der Produktlebenszyklen aufzuzeigen. Durch die simplifizierte Modellierung kann das Modell SysCu auch ohne einen wesentlichen Mehraufwand für andere Basismetalle umfunktioniert werden.

Abstract

Copper (Cu) is a base metal which can be widely used in everyday life and is of considerable economic importance. Copper is extracted from copper ore. In the past decades the worldwide demand for copper has strongly risen. Increasingly fewer ore concentrates in parent rock material are considered mineable and profitable. The global geogenic copper deposits are being recovered more and more progressively, so that copper is becoming increasingly scarce. Due to its unique physicochemical characteristics, copper is a frequently used and essential basic commodity in many products such as *energy and technology transmission*, the *automotive sector*, *stationary motors*, *architecture* or *water installations*. Copper is considered easily recyclable and can be re-used without any loss in quality. Seen on a global scale, at present these features are being insufficiently applied. The *Systems Dynamics* model SysCu (System Copper) developed in this paper takes up this issue.

The aim is to develop a computer supported model for the purpose of describing the global commodity system of copper. The applied *System Dynamics* method enables a comprehensive analysis and simulation of complex and dynamic systems. By means of the mathematically analytic modelling system, correlations can be identified and explained. The understanding of the system and the interaction within the basic commodity system of copper are focussed in the paper on hand. As well as the primary cycle of materials, the developed model SysCu also considers the copper mining of geogenic mines, especially the secondary cycle of materials. This is characterised on the one hand by the share of diverse copper applications, and on the other by their service life and collection rate. In the past and still today, many products are not, or are only recycled to a small extent. They would rather be stored unused as so-called *secret reserves* at, for example, storage sites.

The global consumption of copper is closely connected with the development of the global economy and the population. These aspects are also incorporated in the model SysCu, as is the primary and secondary availability of copper. By means of this extensive worldwide level of observation, it is possible to obtain a simplified, comprehensive understanding of the globally operating commodity system of copper. With the help of the five scenarios—*base run*, *high growth*, *global sustainability*, *pluralism* and *balance*—future forecasts can be represented and conclusions derived.

Studies have shown that between 2045 and 2068 the primary global copper reserves will be exhausted. The amount of unused copper deposits from diverse copper applications is, in contrast, substantial. By using the *secret reserves* a worldwide mineral planning of copper could be achieved. The possibility is subsumed under the term Urban and/or Landfill Mining. Apart from the economic importance, the use of secondary copper from scrap can contribute substantially to global sustainability. By utilising secondary commodities, resources such as water, air and landscape can be significantly protected and thus lead to minimising environmental consequences.

With the help of SysCu it is possible to carry out estimations of global commodity shortages and to identify alternatives such as increasing the recycling rate, or the expansion of product life cycles. By means of the simplified modelling the model SysCu can be converted for other base metals without any substantial additional work or expense.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement sowie dem Institut für Pflanzenzüchtung und Populationsgenetik II an der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. Matthias Frisch, für seine Unterstützung und sein persönliches Engagement. Seine Betreuung und konstruktiven Hinweise haben zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Professor PhD Christoph Müller für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie bei Herrn Privatdozenten Dr. Rolf Alexander Düring und Dr. habil. Gabriel A. Schachtel für ihr Mitwirken in der Prüfungskommission. Für die finanzielle Unterstützung sowie Themenfindung danke ich dem Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement und Herrn Professor Dr. Stefan A. Gäth.

Für mich war die Erstellung der vorliegenden Arbeit eine Herausforderung und persönlich bereichernde Erfahrung zugleich. Den zahlreichen Personen, die mich in vielfältiger Art und Weise unterstützt haben, sowie den mich begleitenden Weggefährten während meiner Promotionszeit, die mir Rückhalt gegeben haben, möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich meinen Dank ausdrücken. Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen an beiden Instituten danke ich für die heiteren Kaffee- und Mittagspausen, lustigen Unternehmungen und motivierenden Worte und die beispiellosen Beistand. Ebenfalls danken möchte ich allen weiteren Personen, die mich direkt und indirekt bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinen Eltern, meiner Familie und Hauke. Ohne ihren immerwährenden Beistand, ihre Zuversicht und Aufheiterung während meiner akademischen und privaten Laufbahn wäre die vorliegende Arbeit nicht das, was sie ist. Durch ihre Förderung und Forderung konnte ich mich zu dem Menschen entwickeln, der ich heute bin.

Gießen 2013

Isabelle Gröticke

*"Kupfer gehört heute zum Alltag wie die Luft zum Atmen.
Ohne Kupfer kein Licht, kein Telefon, kein Auto
oder kein Computer... ."*

[Deutsches Kupferinstitut 2013]

1 Einleitung

1.1 Einführung

Unter den metallischen Rohstoffen ist Kupfer (Cu) das in Studien am meisten betrachtete Element. Nach Eisen und Aluminium erfolgt die weltweite Verwendung von Kupfer an dritter Stelle [Radetzki 2009]. Der globale Pro-Kopf-Bestand von Kupfer wird auf durchschnittlich 35-55 kg beziffert [Gerst und Graedel 2008]. Kupfer gilt als Basismetall für diverse Arten von elektrischen wie elektronischen Anwendungen [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009]. Es ist aus dem Alltag kaum wegzudenken [Deutsches Kupferinstitut 2013]. Daher beschäftigt sich die vorliegende Arbeit speziell mit diesem metallischen Rohstoff. Da Kupfer als eine endliche Ressource gilt und als knappes Gut eingestuft wird, könnte zukünftig ein Defizit zwischen Kupferangebot und -nachfrage auftreten. Ziel der Arbeit ist, den Aspekt der Kupferverknappung in Bezug auf Anwendungen, Lebensdauern, Recyclingquoten etc. durch ein umfassendes Systemverständnis zu beleuchten.

Die hier verwendete Methodik zur Erläuterung der Systemzusammenhänge des globalen Rohstoffsystems Kupfer lautet *System Dynamics*. Sie erlaubt dynamische stark interagierende Zusammenhänge vereinfacht und plausibel wiederzugeben [Stermann 2000]. *System Dynamics* bildet ein interdisziplinäres Forschungsfeld, welches die Wurzeln in der Kybernetik und Systemtheorie hat. Zur Modellierung dienen computerbasierte mathematisch-analytische Modelle, die durch diverse Simulationsläufe Ergebnisse generieren. Das hier entwickelte Modell SysCu (**S**ystem **K**upfer) beschäftigt sich mit den globalen Stoffkreisläufen von Kupfer. Mithilfe des Modells SysCu werden komplexe Systemzusammenhänge vereinfacht dargestellt. Dies ermöglicht, das Verhalten des globalen Kupfersystems zu verstehen, Trends zu modellieren und zu erkennen.

Kupfer gilt als ein wichtiger Indikator für den Wohlstand einer Nation [IIED 2002]. Sowohl für die Telekommunikation, Stromversorgung, in Elektro- und Elektronikkleingeräten, Fahrzeugen oder auch

Wind- und Produktionsanlagen spielt Kupfer eine essentielle Rolle. 15 % eines modernen Handys bestehen beispielsweise aus Kupfer [Geyer und Doctori Blass 2009; Hagelüken und Corti 2010; Reller *et al.* 2009; Sullivan 2006].

Ein Fünftel der Weltbevölkerung erwirtschaftet rund 86 % des Geldes, welches weltweit für den persönlichen Konsum, darunter auch Kupfer, verwendet wird [UNDP 1998]. Der gleiche Anteil fragt etwa 58 % der gesamten Energie, 74 % der globalen Telefonleitungen und 87 % aller Fahrzeuge nach. Somit ist ein relativ kleiner Teil der Menschen an dem Hauptverbrauch diverser energetischer, mineralischer sowie metallischer Rohstoffe maßgeblich beteiligt. In den vergangenen Jahren wandelte sich die Gesellschaft. Von ehemals wenig entwickelten Ländern wie China oder Indien geht ein wirtschaftlicher Boom aus, der sich durch steigenden Rohstoffhunger auch in der globalen Rohstoffversorgung widerspiegelt [Labys 2006; Rosenau-Tornow *et al.* 2009]. So gehen Experten davon aus, dass bei einem Angleichen der Wohlstandslevels ärmerer Nationen an das der Industriestaaten theoretisch zehn Erden nötig seien, um diesen Rohstoffhunger stillen zu können [Brundtland 1994].

Rohstoffe wie Kupfer sind meist relativ punktuell auf der Erde lokalisiert. Nach dem Abbau sowie der Produktion und Verarbeitung wird Kupfer global verschifft. Somit findet eine Verlagerung der ehemaligen geogenen (natürlich vorkommenden und in der Erdkruste entstandenen) Rohstoffe hin zu von Menschen geprägten Standorten statt. Metalle wie Aluminium, Eisen oder Kupfer werden durch diverse Anwendungen als hochkonzentrierte anthropogen-urbane Lagerstätten, den sogenannten *In-Use-Metal-Stocks*, in Industriestaaten akkumuliert [Rauch 2012]. Dadurch werden oftmals ehemals rohstoffreiche Entwicklungsländer durch Abschürfung immer rohstoffärmer [Gleich 2005].

Der globale *In-Use-Metal-Stock* könnte laut Expertenschätzung in den kommenden Jahrzehnten um den Faktor 3 bis 9 ansteigen [Gerst und Graedel 2008]. Durch diese Entwicklung spielen neben den primären Kupfervorkommen auch die sekundären eine immer bedeutendere Rolle. Mithilfe von SysCu werden historische Trends verdeutlicht und die Vision eines möglichst geschlossenen Stoffkreislaufes fokussiert.

Neben den ökonomischen Auswirkungen eines steigenden Bedarfs an Kupfer spielen auch die damit einhergehenden Umweltaspekte bei der Gewinnung eine bedeutende Rolle. Das Basismetall Kupfer zählt zu den zehn umweltintensivsten Stoffen [Lucas *et al.* 2007]. Durch den metallischen Rohstoffabbau werden beträchtliche Mengen an natürlichen Ressourcen wie Energie, Luft, Wasser und Landschaft verbraucht bzw. schwer belastet. Zur Beschreibung des gesamten Ressourcenverbrauchs, der zur Verwendung des Rohstoffes benötigt wird, dient der *ökologische Rucksack*. Dieser ist eine sinnbildliche Darstellung der Ressourcenmengen, die zur Produktion, Verwendung und Entsorgung während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes nötig sind [Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Baden-Württemberg 2010; Schmidt-Bleek *et al.* 1999; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2011]. Der Verbrauch zur Herstellung einer Tonne (Mg) Stahl liegt bei 7 Mg Ressourcen, bei Aluminium 85 Mg, Kupfer 500 Mg, Platin 320.300 Mg und Gold sogar 500.000 Mg [Beyers 2012].

Da Kupfer in der Erdkruste nur in sehr geringen Konzentrationen von meist weniger als 1 % vorkommt, müssen mehrere 100 Mg Geröll bewegt, extrahiert, zerkleinert, gewaschen und mit Chemikalien behandelt werden [Messner 2006]. Zurück bleibt neben dem raffinierten Kupfer auch ein hochtoxisches flüssiges Erzgemisch, welches abgelagert werden muss (Tailingbecken). Bei nicht fachgerechter Entsorgung können schwerwiegende Folgen für das Trinkwasser- und Ökosystem

auftreten [ZEIT ONLINE mobil 2013]. Beim Tagebau von Kupferminen erfolgen somit drastische Einschnitte für die Umwelt. Es werden Flächen von mehr als 300 km² in mehreren hundert Metern Tiefe abgeschürft. Hinzukommt die notwendige Infrastruktur zum Kupferabbau wie Straßen, Tankstellen, Abraumhalden, Verarbeitungsvorrichtungen oder Bergbausiedlungen [Messner 2006; Humphreys 2001]. Die tatsächliche Größe von Kupferminen ist somit um einiges höher. Für die Produktion von 1 Mg Cu fallen zwischen 100 und 350 Mg Abraum und 50-250 Mg (kontaminiertes) Geröll an [Scharp und Erdmann 2006]. Hinzukommen 30-100 GJ Primärenergie, 200-900 m³ Wasser und ca. 5-25 kg eingesetzte Flotationschemikalien. Etwa 300 kg an giftigem Schwefeldioxid (SO₂) werden in die Umwelt emittiert. Wenn man diese Umweltauswirkungen auf die produzierte primäre Kupfermenge hochrechnet, wird deutlich, wie groß die ökologische Belastung ist. Aktuell wird die Belastbarkeit der Biosphäre durch die Inanspruchnahme der Umwelt bereits um 120 % überschritten [Rittmann 2005].

Durch das Schließen von Stoffkreisläufen und dem Wiederverwenden von Metallen, speziell von Kupfer, kann ein zusätzlicher Beitrag zu einer nachhaltigen Zukunft gegeben werden. Neben dem Abbau geogener Reserven (Primärrohstoffe) spielt auch die Verwendung von Sekundärmaterial (Sekundärrohstoffe) eine wichtige Rolle. Kupfer gilt als qualitativ hochwertig rezyklierbar [BGR 2005]. Hierbei spielen die Recyclingquote und die Nutzungsdauer eine wichtige Rolle. Das Modell SysCu implementiert diese Aspekte. Da Kupfer in diversen Anwendungen verbaut wird, reagiert das gesamte Rohstoffsystem mit unterschiedlichen sich gegenseitig bedingenden zeitlichen Verzögerungen. Diese verursachen eine Eigendynamik, die das System schwer kalkulierbar macht. Besonders deutlich wird dies bei Betrachtung der Kupferpreisvolatilitäten (Preisschwankungen) der vergangenen Jahre. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich der Kupferpreis zeitweise um den Faktor 5 erhöht [Papp *et al.* 2008].

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Teile untergliedert. Im ersten Abschnitt wird das Rohstoffsystem Kupfer fokussiert und die daraus resultierenden Forschungsziele abgeleitet. Das 2. Kapitel behandelt die verwendete Methodik und die Grundlagen zur Modellierung und Simulation von komplexen Rohstoffsystemen. Die verwendeten Begrifflichkeiten werden definiert und erläutert. Im 3. Kapitel, dem Ergebnisteil, werden die fünf modellierten Szenarien beschrieben und die Resultate dargestellt. Der vierte Teil der vorliegenden Arbeit diskutiert die modellierten Ergebnisse und es folgt ein Vergleich der fünf Szenarien. Die Ergebnisse werden mit anderen Studien gegenübergestellt und analysiert. Der Aspekt einer möglichen Kupferverknappung wird erörtert und ein möglicher Lösungsansatz mittels *Urban Minings* durch Nutzung der *Stillen Reserve* wird dargelegt. Die verwendete *System Dynamics*-Methodik wird für die Eignung zur Abbildung von Rohstoffsystemen analysiert und die an das Modell gestellten Charakteristika dargelegt. Im fünften und letzten Teil erfolgen ein Ausblick sowie ein zusammenfassender Überblick über die vorliegende Arbeit.

1.2 Modelle für die Beschreibung des Kupfersystems

Obwohl Kupfer eine große wirtschaftliche Bedeutung besitzt, gibt es aktuell kein dynamisches, das Systemverhalten adäquat repräsentierendes Modell, welches auf einer globalen Betrachtungsweise basiert [Chen und Graedel 2012a]. Grund hierfür sind die große, teilweise uneinheitliche und nicht-empirische Datenlage, der Modellierungsaufwand sowie die Komplexität. Die Autoren stellen heraus, dass eine dynamische Betrachtung von Stoffkreisläufen der statischen vorzuziehen ist. Auf regionalem Level oder mit einer statischen Beobachtung eines zugrunde gelegten Jahres existieren bereits Modelle, die diverse Kupferflüsse abbilden [Van Beers *et al.* 2003; Daigo *et al.* 2009; Graedel *et al.* 2004; Guo und Song 2008; Ruhrberg 2006; Spatari *et al.* 2002; Tanimoto *et al.* 2010; Vexler *et al.* 2004; Wittmer 2006]. Eine globale Betrachtung mithilfe von Markovketten, basierend auf statischen Tabellen aus 2000, erfolgt bei Eckelman und Daigo [Eckelman und Daigo 2008].

Graedel *et al.* zeigen ein statisches Kupferflussmodell für 1994 [Graedel *et al.* 2004]. Eine detaillierte Berechnung nach dem *bottom-up* Prinzip der Materialflussanalyse erfolgt bei Gerst [Gerst 2009]. Hierbei werden unterschiedliche Szenarien je nach Kupfergehalt und Technologiebereichen regional und global betrachtet. Der zeitliche Aspekt inklusive Verzögerung durch Nutzungsdauern wird nur unzureichend berücksichtigt. Hinzu kommt, dass der aktuelle Bezug, besonders im Hinblick auf Abfallströme, Recycling und *Urban Mining*, kaum stattfindet [Ayres *et al.* 2002].

Bei der Auswahl der geeigneten Methodik zur Modellierung des Rohstoffsystems Kupfer und der Untersuchung der Interaktionen und des Systemverhaltens sollen folgende Kriterien Berücksichtigung finden:

1) *Dynamik*

Das System Kupfer ist durch das globale Angebot und die variable Nachfrage ein dynamisches Phänomen, dessen ökonomische, soziale und ökologische Problematik bei einer rein statischen Betrachtungsweise verloren geht.

2) *Komplexität des Systems*

Das System wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Daher muss die gewählte Methodik in der Lage sein, umfangreiche Modelle und Parameter zu implementieren.

3) *Nicht-Linearität*

Viele der Variablen sind durch nicht-lineare Operatoren verknüpft. Eine ausschließliche Verwendung von linearen oder log-linearen Funktionen ist daher unzureichend, da die Realität nicht hinreichend genug dargestellt werden kann.

4) *Interdependenzen der Variablen*

Zwischen den Variablen existieren vielfältige Rückkopplungsbeziehungen, die für das Verständnis des Systems unumgänglich sind. Diese Interdependenzen können sich in der Dynamik des Systems deutlich widerspiegeln, so dass die Komplexität des gesamten Systems analysiert werden muss, um verhaltensrelevante synergetische Effekte herauszustellen.

Durch das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Rohstoffmodell für Kupfer SysCu, welches die Dynamik und Komplexität ausreichend berücksichtigt, sollen vergangene und zukünftige Trends erklärt und ein Systemverständnis erwirkt werden. Für die Erfassung der vorherrschenden Vernetzung ist nicht-lineares, interdisziplinäres Denken notwendig, welches unter *System Thinking* subsumiert wird [Olaya

2012; Sterman 1994]. Die Methodik *Systems Dynamics* ist eine Herangehensweise zum besseren Verständnis des Verhaltens komplexer Systeme [Forrester 1994]. Bei der Modellbildung und Simulation wird interdisziplinär, quer über etablierte Fachgebiete und Schulen hinweg gearbeitet, um einen komplexen Ausschnitt aus der Realität darzustellen. Es werden vielschichtige Detailkenntnisse stark vereinfacht, Wirkungen, die Fachexperten für vernachlässigbar halten, teilweise aufgenommen und Hypothesen verwendet, die aus unterschiedlichen Disziplinen stammen [Bossel 1994a]. Formalisierte Simulationsmodelle wie das vorliegende entwickelte Modell SysCu haben nicht den Anspruch der Vollkommenheit [Meadows 1980]. Vielmehr sollen sie dazu dienen, Abbilder der Wirklichkeit darzustellen und aufgrund von mathematischen Formulierungen die Intuition und reinen Gedankenmodelle zu verbessern und zusätzliches Systemverständnis zu bilden [Meadows 1980; Rosnay 1979].

Die Anwendungsgebiete von *System Dynamics* erstrecken sich über ein sehr weites Spektrum von Forschungsbereichen und Fragestellungen, da der zu untersuchende und modellierende Sachverhalt beliebig gewählt werden kann. *System Dynamics*-Modelle finden in vielen verschiedenen Disziplinen wie beispielsweise umweltbezogenen Analysen [Bossel 2004; Khetriwal *et al.* 2012; Ford 1999; Ford 2010], Planungen in diversen Industriezweigen [Atzori *et al.* 2012; Morecroft 2007], im Supply Chain Management [Kumar und Nigmatullin 2011; Tulinayo 2007], im öffentlichem Management [Kumar *et al.* 2012], in der Politikberatung [Kim und Saeed 2012] sowie für biologische [Kwakkel und Timmermans 2012; Kwakkel und Slinger 2012] oder medizinische Studien [Grassmann *et al.* 2012] Anwendung.

Die *System Dynamics*-Modellierung im mineralischen und metallischen Kontext knapper werdender Ressourcen hat eine lange Tradition. Das vermutlich bekannteste Beispiel ist das *World3*-Modell, welches erstmals im Buch *Limits to growth (Grenzen des Wachstums)* publiziert wurde [Club of Rome und Meadows 1972]. Hierin wurden Minerale, fossile Energieträger und Metalle als nicht-erneuerbare Ressourcen betrachtet und die Frage möglicher Konsequenzen für Mensch und Umwelt aufgeworfen. In vielen anderen Studien wurden neben geologischen Aspekten auch technologische und ökonomische Seiten des Rohstoffabbaus betrachtet [Arquitt *et al.* 2005; Davidson *et al.* 1987; Fiddaman 2002; Ford 1997; Sterman und Richardson 1985; Urbance *et al.* 2002; Van Vuuren *et al.* 2010]. So beschäftigt sich Arquitt *et al.* mit der Produktion von Shrimps in der Aquakulturindustrie [Arquitt *et al.* 2005]. Neben der Betrachtung des natürlichen Bestandes werden auch Umweltauswirkungen, die mithilfe eines *System Dynamics*-Modells beschrieben werden, abgebildet. Dabei stehen der Nachhaltigkeitsaspekt und eine Handlungsempfehlung im Vordergrund. Davidson *et al.* sowie Sterman und Richardson betrachten den Sektor fossiler Energieträger [Davidson *et al.* 1987; Sterman und Richardson 1985]. Davidson *et al.* fokussiert sich auf den amerikanischen Rohölmarkt und implementiert Faktoren wie technologischen Fortschritt oder Nachfrage. Bei Sterman und Richardson liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Bestimmung von globalen Rohöl- und Gasvorkommen im Zeitverlauf. Besonders wird auf die Abschätzung und Evaluierung bekannter Vorhersagetechniken eingegangen und diese analysiert. Fiddaman nutzt in seiner Dissertation die *System Dynamics*-Methodik zur Aussage über ökonomische wie ökologische Einflüsse auf den Menschen durch den Klimawandel [Fiddaman 2002]. Er betrachtet speziell die fossilen Energieträger und gibt Handlungsempfehlungen um die CO₂-Emissionen nachhaltig zu reduzieren. Ford befasst sich mithilfe von *System Dynamics* mit der amerikanischen Stromindustrie [Ford 1997]. Urbance *et al.* stellt das Erdalkalimetall Magnesium in den Fokus, speziell im Hinblick auf die steigende Nachfrage seitens der Automobilindustrie [Urbance *et al.* 2002]. Van Vuuren *et al.* beschäftigen sich mit dem globalen Phosphorabbau von 1970 bis 2100 [Van Vuuren *et al.* 2010]. Dabei wird die Phosphor-

anwendung und Bedeutung als Düngemittel besonders berücksichtigt, ebenso wie die endliche Ressourcenverfügbarkeit. Auch Umweltauswirkungen durch übermäßige Düngergabe werden in den *System Dynamics*-Ansatz implementiert.

Spatari *et al.* verwenden in ihrer Studie zum nordamerikanischen Rohstoffsystem Kupfer die Materialflussanalyse (engl. *material flow analysis* - MFA) bzw. Stoffstromanalyse (engl. *substance flow analysis* - SFA) [Spatari *et al.* 2005]. Auch Zeltner *et al.* dynamische US-Studie über den Zeitraum von 1900 bis 2100 basiert auf einer SFA [Zeltner *et al.* 1999]. Wittmer und Lichtensteiger verwenden für ihre Rohstoffanalyse anthropogener Schweizer Lagerstätten eine MFA [Wittmer und Lichtensteiger 2007]. Die MFA quantifiziert Rohstoffflüsse und weist auf die Ressourcenproduktivität hin, bei der SFA wird ein Stoff betrachtet [Bringezu *et al.* 2004; Guinée *et al.* 1999]. Die Gesellschaft und das wirtschaftliche Leben werden durch die MFA als physische Einheiten betrachtet, die im Austausch mit der sie umgebenden Umwelt mittels Rohstoffen und Energie stehen. Das Konzept und der Forschungsschwerpunkt des *socioeconomic metabolism* werden von Fischer-Kowalski und Hüttler detailliert dargestellt [Fischer-Kowalski und Hüttler 1998]. Bei der MFA liegt der Fokus auf der Mengen- und Strukturanalyse innerhalb der Wirtschaft [Bringezu *et al.* 2004]. Mithilfe von MFAs und SFAs können Quellen und Senken verschiedener Stoffe und deren Auswirkungen auf die Umwelt dargestellt werden. Auch Fragen zur stofflichen Verfügbarkeit können beleuchtet werden [Spatari *et al.* 2005]. Viele MFAs und SFAs basieren auf *steady-state* Modellen [Spatari *et al.* 2002]. Daher sind Handlungsempfehlungen, die auf mögliche zukünftige Entwicklungen einwirken und diesen somit auch entgegenwirken können, nur schwer abzuschätzen und integrierbar [Bollinger *et al.* 2012]. Die Betrachtungsebene von sozioökonomischen Systemen kann dabei sowohl global, kontinental als auch lokal erfolgen. Weiche Faktoren wie Kaufentscheidungen, Nachfrageschwankungen etc. können durch diese Methodik allerdings nicht implementiert werden. Dies ist jedoch für das Systemverständnis von fundamentaler Bedeutung [Sterman 2000]. *System Dynamics* kann diese Aspekte einfließen lassen und ausreichend berücksichtigen.

1.3 Rohstoffsystem Kupfer

Kupfer ist ein metallischer Industrierohstoff. Kaum ein anderes Metall wird häufiger verwendet und mengenmäßig aus Erzen gewonnen. Kupfer zählt zu den bedeutendsten Rohstoffen weltweit. Allein im 20. Jahrhundert wurden rund 90 % des bisher in fünf Jahrtausenden extrahierten Kupfers abgebaut und produziert [Lifset *et al.* 2002]; allein 70 % in den letzten 50 Jahren, rund die Hälfte in den vergangenen 25 Jahren.

1.3.1 Das chemische Element Kupfer

Metalle und andere Minerale werden aus den verschiedensten Zwecken extrahiert und bilden die Grundlage zur Herstellung von vielen essentiellen Gegenständen des Alltags. Kupfer ist das Metall, welches neben Gold bereits 7000 v. Chr. von Menschen verwendet wurde [Ayres *et al.* 2002]. Es ist gediegen, d. h. in reiner chemischer Form, in der Natur vorzufinden [Arpaci 2000]. Seit der Verwendung von Elektrizität im Jahre 1850 hat sich das abgebaute Kupfervolumen um das 300-fache gesteigert [Radetzki 2009]. Bezogen auf die Menge, zählt Kupfer zu dem dritt wichtigsten Metall nach Stahl und Aluminium.

Kupfer ist ein Nicht-Eisen-Metall und Buntmetall. Aufgrund seiner häufigen und vielfältigen Verwendung in vielen industriellen Produkten und Branchen gehört Kupfer zu den Basismetallen. Es wird charakterisiert durch eine sehr hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit, Rezyklierbarkeit sowie Umformbarkeit. Diese Eigenschaften bilden die Grundlage für den breiten Einsatz [Arpaci 2000]. Kupfer besitzt antibakterielle Wirkungen und wird daher als Biozid eingesetzt. Diese Anwendung ist allerdings heutzutage wegen der möglichen Schädigung der aquatischen Biozönose rückläufig [Angerer *et al.* 2010].

Aus geophysischer Sicht ist Kupfer gut und mit relativ geringen Unsicherheiten dokumentiert [Enghag 2004; ICSG 2010; USGS 2009; USGS 2012]. Die durchschnittliche geogene Konzentration in der Erdkruste beträgt 50 ppm (parts per million) [BGS 2007; Bringezu 2011]. Es befindet sich allerdings erst auf Platz 28 der am häufigsten vorkommenden Elemente der Erdkruste [Ayres *et al.* 2002]. Es gilt als geochemisch knapp [Gordon *et al.* 2006], auch wenn es weltweit zu den größten Erzressourcen zählt [Bringezu 2011].

1.3.2 Reserven, Reservebasis, Ressourcen

Kupfer befindet sich ubiquitär als Kupfererz in der Erdkruste. Diese potenziell im Kupfererz enthaltene Kupfermenge bildet die Basis der *Kupferressourcen* [USGS 2013]. Eine quantitative Abstufung nach Erzkonzentration erfolgt hier nicht. Als *Reservebasis* wird der Anteil an Ressourcen bezeichnet, der den aktuellen minimalen chemischen wie physikalischen Kriterien zum Abbau und Produktion genügen und damit in näherer Zukunft extrahierbar sein werden. Die *Reserve* spiegelt den Teil der Reservebasis wider, welcher momentan ökonomisch extrahiert und produziert werden kann. Im Zeitverlauf findet eine Verschiebung der Kupfervorkommen statt: Von der Ressource zur Reservebasis hin zur Reserve [USGS 2012]. Aktuell liegt der Erzgehalt des primär abgebauten Kupfers im Mittel bei unter 1 % [Lucas *et al.* 2007], ab einer Konzentration von > 0,4 % gilt es derzeit als abbauwürdig [BGS

2007; Ley 2004]. Anfang des 20. Jahrhunderts lag der Metallgehalt von gerade noch wirtschaftlich gewinnbaren Kupfers noch bei rund $25 \text{ kg} \cdot \text{Mg}^{-1}$ Erz (2,5 % Erzkonzentration) [BGR 2005]. Die Abbauwürdigkeit und somit die Reserve wird maßgeblich von der Preisentwicklung, der Technologie und der Marktsituation beeinflusst [Arpaci 2000]. Bei höheren Preisen lohnt auch ein Abbau geringerer Erzkonzentrationen des Ausgangsgesteins, die Reserve vergrößert sich somit.

Die größten Kupferreserven mit einem weltweiten Anteil von etwa 30 % lagern in Chile [Papp *et al.* 2008].

Aufgrund des schnellen Preisanstiegs der vergangenen 10 Jahre und einer zunehmenden Prospektion haben die dokumentierten Mengen an Reserven und somit die Reservebasis zugenommen [Gleich *et al.* 2004; USGS 2008; USGS 2012]. Die weltweiten Ressourcen werden auf rund 3,7 Mrd. Mg Cu beziffert (Tabelle 1-1). Davon zählt etwa ein Viertel zur Reservebasis und ein Fünftel zur Reserve. Rund 700 Mio. Mg Cu der weltweiten Kupferressourcen werden in Tiefseeknollen vermutet [USGS 2008]. Diese Mangan- oder polymetallischen Knollen sind aufgrund ihrer hohen Gehalte an Kupfer, Nickel und Kobalt ökonomisch interessant [BGR 2005]. Die mittlere Zusammensetzung einer Knolle besteht aus 30 % Mangan, 10 % Eisen, 1,5 % Nickel, 1,2 % Kupfer und 0,2 % Kobalt. Die Vorkommen sind in den Weltozeanen in 4.000 bis 6.000 m Tiefe lokalisiert. Als besonders potenziell abbauwürdige Knollen gelten solche im zentralen Pazifischen und südöstlichen Indischen Ozean. Neben den Manganknollen werden die sogenannten Massivsulfid-Vorkommen als besonders lukrativ angesehen. Diese entstehen als Ausfällung untermeerischer Quellen, die 250 bis 400 °C heiß sind, genannt *Black-smokers*. Diese sind lokal auf wenige hundert Meter begrenzt und reihen sich häufig perlschnurartig entlang vulkanisch aktiver Ränder der Erdkrusten auf dem Meeresboden auf.

Tabelle 1-1: Datengrundlage Reserven, Reservebasis und Ressourcen

	Menge	Quelle
Ressourcen (landgebunden)	3 Mrd. Mg	[USGS 2012]
Ressourcen (Tiefseeknollen)	700 Mio. Mg	[USGS 2008]
Reservebasis	940 Mio. Mg	[Kapur 2006; USGS 2008]
Reserve	690 Mio. Mg	[USGS 2012]

1.3.3 Kupferangebot und -nachfrage

Das südamerikanische Chile zählt mit über 34 % der weltweiten Kupferproduktion als Weltmarktführer [Menzie *et al.* 2013; Nishiyama 2005]. Zu den Top-5-Produzenten zählen außerdem Peru, China, die USA und Indonesien [Hilpert und Mildner 2013]. Weitere Länder sind Australien, Kasachstan, Mexiko, Polen und Saudi Arabien [BGR 2005].

China spielt neben Chile eine Schlüsselrolle im Rohstoffsystem Kupfer [Menzie *et al.* 2013; Nishiyama 2005; Radetzki 2009]. Das schnelle Wirtschaftswachstum und die daraus resultierende steigende Nachfrage nach Rohstoffen wie Kupfer begann mit der Abwendung der zentralistischen Planwirtschaft hin zur Marktwirtschaft Ende der 1990er Jahre [Nishiyama 2005]. Im Zeitraum von 1998 bis 2007 lag

die jährliche chinesische Wachstumsrate von raffiniertem Kupfer bei 15,3 % [Radetzki 2009]. Im Vergleich dazu wuchs die durchschnittliche globale Kupfernachfrage um lediglich 1,2 %. 2009 betrug der chinesische Anteil am globalen Kupfergebrauch 36 %, gefolgt von Westeuropa, Nordamerika und Japan (Abbildung 1-1). Ende der 1990er Jahre lag der chinesische Anteil noch lediglich bei 10,5 % [Radetzki 2009].

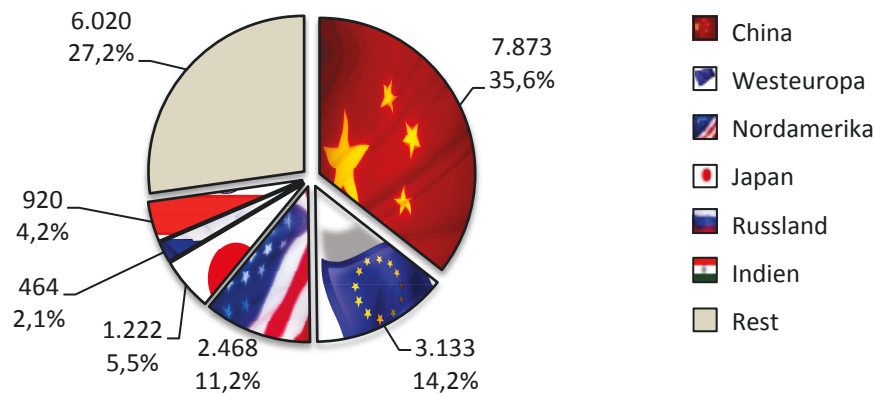


Abbildung 1-1: Kupfergebrauch [1.000 Mg bzw. %] nach Ländern und Regionen im Jahr 2009 [ICSG 2010]

Der Pro-Kopf-Konsum von Kupfer wird als ein Indikator des Fortschritts und des Lebensstandards eines Landes angesehen [Arpaci 2000]. Sich entwickelnde Länder wie China oder Indien sind durch ihre stark wachsende, prosperierende Wirtschaft gekennzeichnet. Hinzu kommt das große Bevölkerungswachstum, welches zusätzlich Einfluss auf den Lebensstandard und die Wirtschaftskraft und somit den Kupfergebrauch eines Landes hat. Diese Entwicklung dürfte den globalen Kupferkonsum stark beeinflussen und wird daher als ein Hauptfaktor für die zukünftige Prognose der Kupfernachfrage angesehen [Nishiyama 2005]. Bis 2025 könnte der weltweite Kupferverbrauch um 72 % ansteigen, was einem jährlichen Zuwachs von 2,7 % entsprechen würde [RWI Essen *et al.* 2006].

1.3.4 Raffiniertes Kupfer und Kupferanwendungen

Aufgrund seiner guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit sowie vielseitigen Legierbarkeit ist Kupfer nach Eisen/Stahl und Aluminium der am häufigsten eingesetzte Massenrohstoff in Deutschland [Lucas *et al.* 2007] und der Welt [ICSG 2010]. Der Pro-Kopf-Verbrauch auf gesättigten Märkten entwickelter Länder beträgt jährlich mehr als 10 kg Kupfer [Lucas *et al.* 2007].

Abbildung 1-2 zeigt den Trend der Produktion von raffiniertem Kupfer (engl. *refined copper*) seit 1990. Die raffinierte Kupferproduktion liegt etwas über der abgebauten Kupfermenge, da rund 15 - 30 % aus Kupferschrott stammen [Ayres *et al.* 2002; ICSG 2010]. Die Angaben zu den Anteilen von primärem und sekundärem Kupfer am Gesamtkupfer variieren sehr stark. Grund ist die teilweise unzureichende Dokumentation und schlechte Datenerfassung [RWI Essen *et al.* 2006]. Innerhalb von rund 20 Jahren hat die weltweite Kupferproduktion um 191 % zugenommen. 2012 wurden etwa 17.000 Mg Cu produziert und verwendet [USGS 2013].

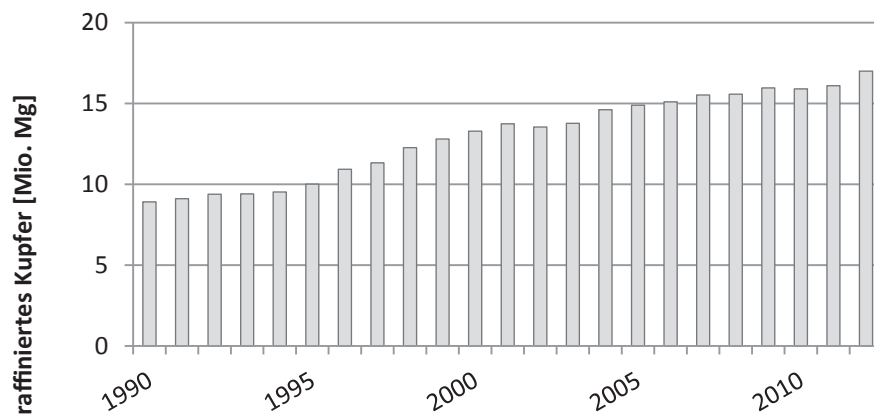


Abbildung 1-2: Entwicklung des jährlichen globalen Kupferangebotes [Mio. Mg] seit 1990
[Commodity Research Bureau 2010; USGS 2013]

Bei der weltweiten Verwendung von Kupfer können beispielhaft nach Angerer *et al.* sechs Kategorien bestimmt werden (Abbildung 1-3 und Tabelle 1-2). Eine exemplarische Übersicht über Produkte, die bei den einzelnen Kupferapplikationen implementiert sind, gibt Tabelle 1-2.

Tabelle 1-2: Segmente der sechs Kupferapplikationen mit Produktbeispielen [Angerer *et al.* 2010]

Kupferapplikation	Produktbeispiele
Automobilsektor (Pkw inkl. Transporter, SUV, Minivans)	elektrische Traktionsmotoren, elektrische Servomotoren, Verbrennungsmotoren, Lichtmaschine, Anlasser, Kühler, Kabelbäume, Engine Control Unit (Motorsteuerung), Sensoren, Aktuatoren, Stecker, Relais, Batterien
Stationäre Elektromotoren	Antrieb von Maschinen, Pumpen, Verdichtern, Lüftern, Rührern, Förderbändern, Aufzüge, Stellantriebe in Kfz und vielen anderen Produkten
Energie- und Technologieübertragung	Kraftwerke, Wind- und Solaranlagen, Transformatoren, Hochspannungserd- und seekabel, Drosseln, Spulen, Strom- und Datenleitungen in Gebäuden, Telefondrähte, Antennen- und Lautsprecherkabel
Wasserinstallation	Rohre, Fittings, Messingarmaturen
Architektur	Dächer, Fassaden, Regenrinnen, -fallrohre
Sonstiges	LKW, Krafträder, Elektroloks, Schiffsantriebe, Medizintechnik, Haushaltsgeräte, Kühlschränke, Gefrierschränke, Herde, Öfen, Klima- und Lüftungsanlagen, Beschläge, Lote, Messingventile, Lagerwerkstoffe, Bleche, Bänder, Rohre, Mikrochips, Leiterplatten, Stecker, Anschlussleisten, Kühlkörper, Wärmerohre, Türklinen, Münzen, Uhren, Schmuck, Pflanzen- und Holzschutzmittel, Kupferdrähte für Fischfarmen

Der Kupferanteil innerhalb der einzelnen Anwendungsbereiche gilt bei Industrieländern als relativ vergleichbar [Ayres *et al.* 2002]. In sich entwickelnden bzw. wenig entwickelten Ländern sind die Anteile von Kupferapplikationen deutlich geringer, allerdings findet im zeitlichen Kontext allmählich eine Anpassung an die entwickelten Länder statt. Eine valide globale Datenlage ist allerdings nicht vorhanden [Graedel *et al.* 2002]. Abbildung 1-3 zeigt, dass sich die Anwendungsgebiete von Kupfer

aufgrund verschiedener Faktoren wie technologischer Fortschritt oder Entwicklungsstand im zeitlichen Kontext deutlich verschieben [Angerer *et al.* 2010; Graedel *et al.* 2002].

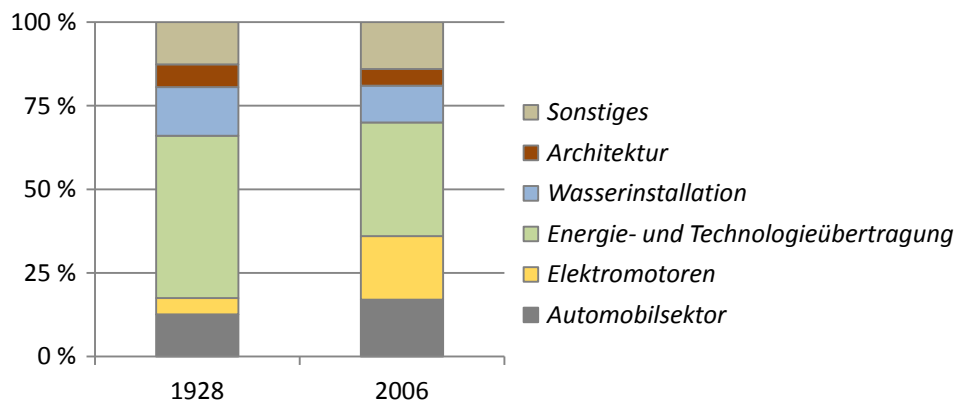


Abbildung 1-3: Zeitliche Verschiebung und Vergleich der prozentualen Anwendung der sechs Kupferapplikationen von 1928 und 2006 [nach Angerer *et al.* 2010]

Innerhalb des vergangenen Jahrhunderts hat der Anteil an Kupfer in der *Energie- und Technologieübertragung* relativ gesehen um den Faktor 2 zugenommen (Abbildung 1-3). Kupfer findet hier Verwendung in der Produktion von Erd- und Seekabeln sowie Stromleitungen (Tabelle 1-2). Der Ausbau der regenerativen Energien wie Wind, Geothermie, Photovoltaik oder Biomasse erhöht zudem den Kupferbedarf, da eine Dezentralisierung der Anlagenstandorte stattfindet und somit der Bedarf an Erd- oder Seekabeln steigt [Angerer *et al.* 2010; European Copper Institute 2010]. Hinzu kommt, dass immer mehr Menschen in urbanen Räumen leben und dies mit einem starken Ausbau der Infrastruktur einhergeht [UN 2004]. Besonders in den *wenig entwickelten* und *sich entwickelnden* Ländern ist die Nachfrage an elektrischer Energie für den Grundbedarf sehr hoch. Ein zukünftiger Ausbau der elektrischen Infrastruktur wird als Voraussetzung für die Entwicklung und die Erhöhung des Lebensstandards angesehen. Auch wenn Kupferdatenleitungen immer häufiger durch Glasfaserleitungen substituiert werden, ist dies aus technischen und ökonomischen Gründen nicht immer möglich und umsetzbar. Die Kupferanteile dieser Anwendung werden dem vergangenen steigenden Trend weiter folgen.

Der Bereich *Sonstiges* hat seine Anteile von 1928 bis 2006 ebenfalls mehr als verdoppelt. Dieser deutliche Zuwachs auf über ein Drittel der gesamten Kupferanwendungen ist damit zu begründen, dass in diese Kategorie diverse Produkte wie Haushaltsgeräte, LKW, Mikrochips und Leiterplatten fallen. Hierbei hat der technologische Fortschritt in besonderem Maß Einfluss genommen. Hinzu kommt der demografische Wandel, der den Konsum von Medizinprodukten etc. einer alternden Gesellschaft steigert und somit auch den Verbrauch von verbautem Kupfer [ICA 2007].

Bei Kupferapplikationen im *Architektursegment* (Dächer, Fassaden etc.) ist eine Verringerung um den Faktor 6 zu beobachten. Grund für diese Entwicklung ist der starke Preisanstieg der vergangenen Jahre. Dies wird sich nach Expertenmeinung auch zukünftig ähnlich verhalten [Angerer *et al.* 2010].

Ein weiteres Segment von Kupferanwendungen ist die Nutzung von Kupferrohren in der Trinkwasserinstallation. Der Anteil von Kupfer in der *Wasserversorgung* ist aufgrund der bioziden Wirkung der Kupferionen um etwa 13 % zurückgegangen [Angerer *et al.* 2010; Erdmann *et al.* 2011; ICA 2012]. Hier findet zunehmend eine Substitution durch Kunststoffrohre statt (Abbildung 1-3). Zudem hat die Preissteigerung des Rohstoffs Kupfer diesen Trend verstärkt.

Die relativen Kupfermengen im *Automobilsektor* sind hingegen auf 120 % angestiegen (Abbildung 1-3). Bei Elektrofahrzeugen sowie Ladestationen von elektrischen Batteriefahrzeugen wird eine große Menge an Kupfer benötigt [Angerer *et al.* 2010]. Da sich diese Sparte erwartungsgemäß stark entwickeln wird, ist zu erwarten, dass dieser Trend anhält und sich noch verstärkt [ICA 2012; Lucas *et al.* 2007].

1.3.5 Substitutionsmöglichkeiten

Unter Substitution wird der qualitative Ersatz von Kupfer durch andere Metalle und Stoffe verstanden [Ashby 2012a]. Aufgrund relativ niedriger Kupferpreise in der 2. Hälfte und gegen Ende des 20. Jahrhunderts war der Druck, Substitutionsmöglichkeiten zu erschließen, relativ gering [Gordon *et al.* 2006]. Hinzu kommt bei der Betrachtung der Substituierbarkeit, dass Basismetalle wie Kupfer in großen Mengen verwendet werden und somit die Substitute dieser Nachfrage ebenfalls nachkommen müssen [Mildner 2011]. Die Preisentwicklung der Substitute spielt dabei eine entscheidende Rolle [Gordon *et al.* 1987].

Die Substituierbarkeit von Kupfer ist in bestimmten Teilsegmenten wie der *Telekommunikationstechnik* sinnvoll und praktikabel [Erdmann *et al.* 2011]. Der Einsatz von Glasfaser oder Funk stellt eine Alternative dar. Im Bereich der *Stromübertragung* ist Kupfer aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften Aluminium überlegen. Diese Charakteristika sind daher eher als substitutionshemmend anzusehen. Teilweise findet aufgrund des niedrigeren Preises dennoch ein Austausch durch (Leit-) Aluminium bei Stromleitungen und Starkstromkabeln statt [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009]. Besonders bei der Energiegewinnung und -verteilung zählt Kupfer allerdings zu den bedeutendsten Materialien [IIED 2002].

Kupferradiatoren bei Kühleinrichtungen können auch aus Aluminium hergestellt werden [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009]. Bei Wärmeaustauschern findet eine Substitution durch Titan und Stahl statt. *Wasserinstallation* und Produkte aus dem *Architektursegment*, beispielsweise Rohre von Fußbodenheizungen, können durch Kunststoffleitungen ersetzt werden. Bei Armaturen, wo Kupferlegierungen breite Anwendung finden, ist eine Substitution eher schwierig, da Stähle, die die Funktionalität gut ersetzen könnten, im Herstellungsprozess aufwendiger sind [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009].

Für viele Kupferanwendungen im *Automobilsektor* sind nach aktuellem Stand keine geeigneten Substitute bekannt [Erdmann *et al.* 2011]. In der Autoelektronik kann Aluminium Kupfer teilweise ersetzen. Allerdings muss aufgrund seines niedrigeren Leitwertes die Aluminiumleitung einen rund 60 % höheren Querschnitt als eine Kupferleitung aufweisen [Lucas *et al.* 2007]. Aufgrund der geringen Dichte von Aluminium kann jedoch eine Gewichtsersparnis von rund 50 % erzielt werden. Der Kupferverbrauch dürfte in *Motoren* und *Elektronikteilen* nur schwer substituierbar sein [IIED 2002].

Vor allem in Zukunftstechnologien wie Offshore-Windenergie oder Elektromobilität werden die Eigenschaften von Kupfer genutzt und erschweren somit eine Substitution [Erdmann *et al.* 2011]. Auch die *International Copper Association* sieht zukünftig einen steigenden Bedarf an Kupfer, um Innovationen und Technologieentwicklungen umsetzen zu können [ICA 2013]. Kupfer ist ein Massenmetall, welches aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit dennoch kaum im großen Umfang ersetzbar sein dürfte [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009].

1.3.6 Produktlebensdauer, Nutzungsdauer

Die bis Anfang des 21. Jahrhunderts weltweit geförderte Kupfermenge wird auf rund 400 Mio. Mg Cu geschätzt [Gleich *et al.* 2004; IIED 2002]. Davon befinden sich noch rund 85 % in Nutzung [European Copper Institute 2010; IIED 2002; Lifset *et al.* 2002; Wuppertal Institut 2008]. Ein Teil hiervon, ausgedrückt durch die Recycling- oder Wiederverwendungsquote, kann nach der spezifischen Nutzungsdauer als Sekundärschrott wieder potenziell verfügbar gemacht werden [Ashby 2012b]. Bei der Wiederverwendung von Kupfer muss jedoch beachtet werden, dass die Lebensdauer der verschiedenen Kupferapplikationen sehr variabel ist (Tabelle 1-3). Zudem nimmt im Rahmen des technologischen Wandels der Gesellschaft der Lebenszyklus vieler Produkte stetig ab, so dass der Ressourcenverbrauch exponentiell ansteigt, aber auch die *Turnover rate* der anthropogenen Kupferlagerbestände sich verkürzt [Kapur und Graedel 2006].

Tabelle 1-3: Vergleich von Lebensdauern einzelner Kupferanwendungen bzw. -produkte

Applikation/Produkt	Lebensdauer [Jahre]	Quelle
Stromkabel und -leitungen	30-40	[Lucas <i>et al.</i> 2007]
Verteiltransformatoren	40-50	[Lucas <i>et al.</i> 2007]
Immobilien	40±20	[Wittmer 2006]
Mobilien	14±7	[Wittmer 2006]
Fahrzeuge	10±5	[Wittmer 2006]
Gebäude und Konstruktion	40±35	[Goonan 2010]
Elektrische und elektronische Produkte	18±16	[Goonan 2010]
Industrielle Maschinen und Ausstattung	18±16	[Goonan 2010]
Konsumgüter	10±10	[Goonan 2010]
Telekommunikationskabel	50	[Graedel <i>et al.</i> 2002]
Kupferrohre	60	[Graedel <i>et al.</i> 2002]
Starkstromleitungen	40	[Graedel <i>et al.</i> 2002]
Kabel	40	[Spatari <i>et al.</i> 2005]
Andere Transportmittel	30	[Spatari <i>et al.</i> 2005]
Fahrzeuge	10	[Spatari <i>et al.</i> 2005]
Eingebaute Geräte	17	[Spatari <i>et al.</i> 2005]
Automobilsektor*	10	[Angerer <i>et al.</i> 2010]

Stationäre Elektromotoren*	8	[Angerer <i>et al.</i> 2010]
Energie- und Technologieübertragung*	50	[Angerer <i>et al.</i> 2010]
Wasserinstallation*	80	[Angerer <i>et al.</i> 2010]
Architektur*	80	[Angerer <i>et al.</i> 2010]
Sonstiges*	10	[Angerer <i>et al.</i> 2010]

* für SysCu verwendete Lebenszyklen für Szenario *Baserun*

1.3.7 Recycling

Kupfer ist qualitativ hochwertig und zu hundert Prozent rezyklierbar [ICA 2012; Lucas *et al.* 2007]. Es weist somit keine Qualitätsunterschiede zwischen Primär- und Sekundärkupfer auf [Angerer *et al.* 2010]. Gleich *et al.* nennen folgende Faktoren, die bei dem Metallrecycling und dessen Qualität eine entscheidende Rolle spielen [Gleich *et al.* 2004]:

- Effektivität
- Effizienz
- Reinheit

Effektivität bedeutet, dass der Anteil dissipativer Verluste möglichst gering ist und eine möglichst vollständige Sammlung stattfindet (Abbildung 1-4). Bei der Effizienz wird unter Nachhaltigkeitsaspekten der technische, ökologische und ökonomische Recyclingaufwand am Recyclingertrag betrachtet [Angerer *et al.* 2010; Gleich *et al.* 2004]. Hinzu kommt die Reinheit des Ausgangsmetalls, welches die Qualität des Sekundärkupfers beeinflusst.

Das heute abgebaute primäre Kupfer ist zukünftig Sekundärkupfer, welches in die Stoffströme einfließt [ICA 2013]. Zwischen 5 und 25 % des raffinierten Kupfers gehen als primärer Kupferschrott dem Stoffkreislauf verloren, beispielsweise in Form von Stanzabfällen etc. [Gómez *et al.* 2007].

Bei der Betrachtung der Recycling- bzw. Wiederverwendungsrate wird deutlich, dass unterschiedliche Faktoren darauf Einfluss nehmen und sie sich aus folgenden Quoten zusammensetzt (Abbildung 1-4):



Abbildung 1-4: Zusammensetzung der Wiederverwendungsrate (Recyclingquote) aus Sammelquote, Rückgewinnungsrate und Effizienzrate

Die Sammelquote (engl. *collection rate*) entspricht dem Anteil an Produkten, die branchenspezifisch gesammelt werden und somit potenziell dem Sekundärkreislauf zur Verfügung stehen. Diese Quote variiert je nach Anwendungsgebiet stark (Tabelle 1-4). Die Rückgewinnungsrate (engl. *recover rate*) drückt aus, wie viel Kupfer aus dem gesammelten Produkt praktisch selektiert werden kann. Die Rückgewinnungsrate variiert je nach Kupferanwendung zwischen 72 und 81 % [Angerer *et al.* 2010]. Dass Kupferanwendungen aus *Wasserinstallation* und *Architektur* etwas mehr rückgewonnen werden können, liegt daran, dass das Kupfer hierin konzentrierter vorzufinden ist. Bei den anderen

Anwendungen befindet sich das Kupfer häufig in mehreren Bauteilen, was die Rückgewinnungsrate mindert. Die Effizienzrate (engl. *efficiency rate*) liegt bei allen Anwendungen bei 95 %. Sie besagt, wie hoch das Verhältnis von *Input* und *Output* sowie dem Aufwand und den daraus resultierenden Kosten ist.

Tabelle 1-4: Höhe der Sammelquote, Rückgewinnungsrate, Effizienzrate und Wiederverwendungsrate kategorisiert nach den sechs Kupferapplikationen [Angerer et al. 2010]

Kupferapplikation	Sammelquote* [%]	Rückgewinnungsrate** [%]	Effizienzrate** [%]	Wiederverwendungsrate*** [%]
Automobilsektor	80	72	95	54,7
Stationäre Elektromotoren	70	72	95	47,9
Energie- und Technologieübertragung	80	72	95	54,7
Wasserinstallation	30	81	95	23,1
Architektur	80	81	95	61,6
Sonstiges	50	72	95	34,2

* für SysCu verwendete Sammelquote für Szenario *Baserun*

** für SysCu verwendete Raten für alle Szenarien konstant

*** für SysCu beispielhaft berechnete Wiederverwendungsrate für Szenario *Baserun*

Das Recycling ist neben der Sicherung der Rohstoffversorgung vor allem aus Nachhaltigkeitsaspekten von größter Bedeutung. Die Umweltauswirkungen durch die primäre Kupferproduktion sind energetisch und ökologisch erheblich. Für die Herstellung einer Tonne raffinierten Kupfers werden je nach Erzgehalt im Ausgangsgestein zwischen 100 - 200 GJ Energie benötigt [Forrest und Szekely 1991]. Bei der Sekundärproduktion hingegen werden je nach Qualität, Reinheit und Schrotttyp zwischen 25 und 92 % weniger Energie benötigt [Ashby 2012c; Ayres 1996; Forrest und Szekely 1991; ICA 2012; Wellmer und Wagner 2006]. Der ökologische Rucksack ist eine Maßzahl zur bildhaften Beschreibung des Ressourcenverbrauchs zur Produktion eines Rohstoffes. Kupfer wird ein Wert des Faktors 500 zugeordnet. Dieser Wert drückt aus, dass für eine Tonne Primärkupfer rund 500 Mg Ressourcen wie beispielsweise Gestein, fossile Brennstoffe, Chemikalien, Wasser und Luft benötigt werden [Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Baden-Württemberg 2010; Schmidt-Bleek et al. 1999; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2011]. Für Sekundärkupfer minimiert sich der ökologische Rucksack erheblich, da neben den Energieeinsparungen kaum Abraum, Abwasser etc., basierend auf der primären Minenproduktion, anfällt.

Der aktuelle Anteil an Sekundärkupfer am gesamten Angebot variiert je nach Quelle stark und liegt zwischen 20 und 45 % [Angerer et al. 2010; Ashby 2012c; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2010; ICSG 2010; IIED 2002; UNEP 2011]. In Europa stammen rund 41 % des verwendeten Kupfers aus Sekundärkupfer [ICA 2013b]. Ayres et al. geht davon aus, dass im Laufe des 21. Jahrhunderts Recycling die dominante Kupferquelle werden wird [Ayres et al. 2002].

1.3.8 Abfallströme/Deponien

Da die Recyclingquoten global betrachtet sehr gering sind, ist davon auszugehen, dass beträchtliche Mengen an Kupfer noch in Deponien lagern und potenziell dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden können (*Landfill Mining*). Allein auf dem nordamerikanischen Kontinent könnte das 4- bis 5-fache des jährlichen weltweiten Kupferverbrauchs als *Stille Reserve* auf Deponien vorhanden sein [Gordon *et al.* 2006; Kapur und Graedel 2006]. Das globale urbane Kupfervorkommen wird von Kapur und Graedel auf rund 400 Mio. Mg Cu geschätzt [Kapur und Graedel 2006]. Aufgrund der korrosionsbeständigen Eigenschaften können diese anthropogenen Lagerstätten zukünftig theoretisch wieder nutzbar gemacht werden [Angerer *et al.* 2010].

In Europa fallen nach Schätzungen jährlich pro-Kopf rund 2 kg Kupferabfälle an [Bertram *et al.* 2002]. Die durchschnittliche Kupferfraktion pro kg Trockensubstanz wird von Wittmer für die Schweiz auf rund 1 g geschätzt [Wittmer 2006]. Die Konzentration, die momentan als abbauwürdig in geogenen Erzkörpern extrahiert wird, liegt bei < 0,4 %. Somit liegt laut verschiedener Studien der Kupfergehalt in Abfallströmen, die deponiert werden und wurden, in signifikant höheren Konzentrationen vor als in den primären Erzkörpern [Allen und Behmanesh 1994; Ayres 1996; Rauch 2009]. Ohne die Nutzung dieser *technospheric mines* bleiben wichtige Kupferressourcen wertlos und stehen somit den Stoffkreisläufen nicht mehr vollständig zur Verfügung [Kapur und Graedel 2006; Rauch 2009]. Als mögliches Potenzial der Rohstoffsicherung wird das *Urban Mining* bzw. *Landfill Mining* in Betracht gezogen [Chen und Graedel 2012b; Graedel 2011].

1.3.9 Dissipative Verluste

Dissipative Verluste, beispielsweise durch Korrosion, sind kaum bis gar nicht in den Kreislauf rückführbar [Kapur und Graedel 2006]. Es gibt mehrere Wege, wie in Gebrauch befindliches Kupfer zu nicht-wieder rückführbarem, also dissipativem Kupfer wird [Ayres *et al.* 2002]:

- Nahrung
- Chemikalien
- Korrosion
- Produkte, die Kupfer enthalten und ausgemustert werden.

Der Mensch benötigt über die Zufuhr von Nahrungsmitteln rund 1,5 bis 3 mg Cu pro Tag [Ayres *et al.* 2002]. Dieses akkumuliert jedoch nicht im Körper, sondern wird ausgeschieden und sorbiert anschließend am Klärschlamm. Des Weiteren findet Kupfer auch in Chemikalien, beispielsweise als Fungizid, Holzschutzmittel, Pigment, Katalysator und Schiffsbodenfarbe, Anwendung [Ayres *et al.* 2002; Scharp und Erdmann 2006]. Die dissipativen Kupferverluste werden auf rund 20 % beziffert [Landner und Lindeström 1999]. Im Automobilsektor werden durch das Abnutzen von Fahrzeugbremsen oder Reifen über 56 % des verwendeten Kupfers in die Umwelt emittiert [Landner und Lindeström 1999]. Schätzungen zufolge liegt die Rate pro gefahrenem Kilometer bei 1 - 2 mg. Alle diese Kupferanwendungen weisen dissipative Verluste auf, die sich ubiquitär in der Umwelt ansammeln und somit dem Stoffkreislauf nicht mehr zur Verfügung stehen.

In der Schweiz liegt der dissipative Verlust pro Jahr und Einwohner beispielsweise bei 0,1 kg [von Arx 2006]. Pro Jahr sind somit weniger als 1 % des jährlichen Konsums dissipative Verluste [Ayres *et al.* 2002; Bertram *et al.* 2002; Graedel *et al.* 2004; Kapur und Graedel 2006].

1.3.10 Bevölkerungsentwicklung

Bei Betrachtung der Entwicklung der Bevölkerungszahl wird die Bedeutung des Basismetalls Kupfer deutlich. Je nach Entwicklungslevel und Wohlstand eines Landes variiert der Kupferbedarf erheblich.

Für die zukünftige Entwicklung der Bevölkerungszahlen geben die Vereinten Nationen drei Szenarien mit *hohen*, *mittleren* und *niedrigen* Wachstumsraten heraus [UN 2004; UN 2012]. Es findet eine Kategorisierung in drei Ländergruppen statt: *entwickelt*, *wenig entwickelt* und *kaum entwickelt*. Abbildung 1-5 macht deutlich, dass die Bevölkerung in *wenig entwickelten* Ländern den größten Anteil an der Weltbevölkerung hat und auch zukünftig haben wird. Im Jahr 1960 lebten rund 62 % der Weltbevölkerung in *wenig entwickelten* Ländern, 30 % in *entwickelten* und 8 % in *kaum entwickelten* Ländern. Bis 2100 hat sich dies deutlich verschoben. Etwa 67 % leben aktuell in *wenig entwickelten* Ländern. Lediglich 14 % der Menschen kommen aus *entwickelten* Staaten und 14 % stammen aus *kaum entwickelten* Ländern.

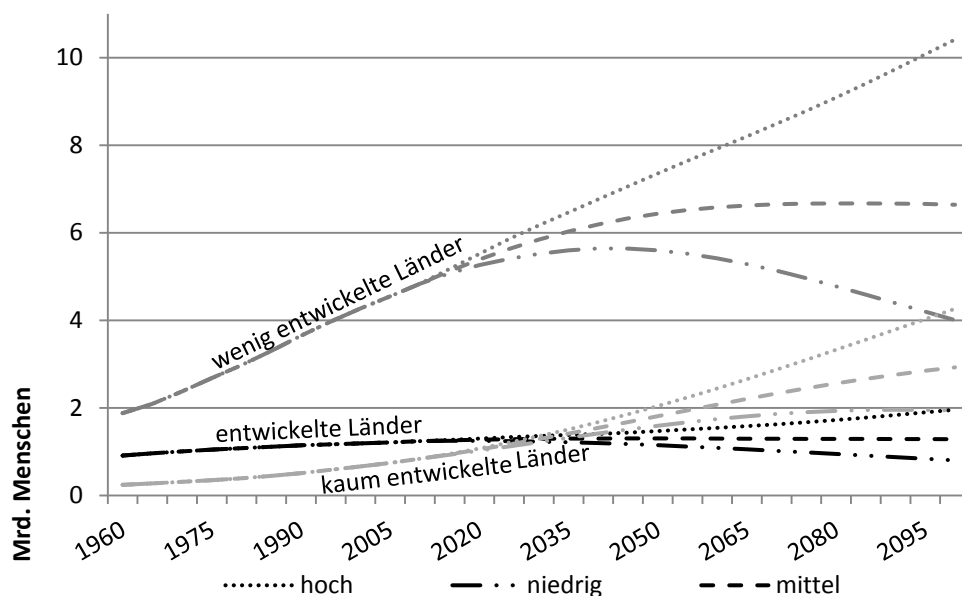


Abbildung 1-5: Historische Entwicklung und Prognose bis 2100 der Weltbevölkerungszahlen [Mrd. Menschen]. Gegenüberstellung der drei UN-Szenarien *hohes*, *geringes* und *mittleres* Bevölkerungswachstum für die drei Länderkategorien *kaum entwickelt*, *wenig entwickelt* und *entwickelt* im Zeitraum von 1960 bis 2100 [UN 2012]

Aufgrund dieser Verschiebung haben sich unterschiedliche gesellschaftliche Bedürfnisse entwickelt, welche sich in der Kupfernachfrage widerspiegeln. Daher ist die zukünftige Prognose der Bevölkerungszahlen für die Betrachtung des globalen Kupfersystems von erheblicher Bedeutung. Je nach UN-Szenario setzt sich diese Verschiebung weiter fort (Abbildung 1-5). Demnach könnten im Jahr 2050 zwischen 15 und 19 % der Menschen in *kaum entwickelten* Ländern wohnen. Der Anteil an Menschen aus *entwickelten* Staaten könnte je nach UN-Variante auf 13 bis 16 % zurückgehen. Die Bevölkerungszahlen variieren 2050 je nach UN-Variante zwischen 8,3 und 11,1 Mrd. Menschen, die die Erde besiedeln und somit Kupfer nachfragen sowie konsumieren werden. Die jährlichen Wachstumsraten von 2000 bis 2050 verändern sich global betrachtet beim Szenario mit *niedrigem* Wachstum von 3,0 % bis 3,9 % für das *hohe* Wachstumsszenario. Bis 2100 wird diese Veränderung noch deutlicher. Bei *geringem* Bevölkerungswachstum liegt die jährliche Quote bei 1,1 %, bei *hohem* Wachstum bei 2,7 % basierend auf Zahlen aus 2010.

1.3.11 Weltwirtschaft und Pro-Kopf-Kupfer-Verbrauch

Der Verbrauch von Massenrohstoffen (engl. *commodities*) mit einem breitem Verwendungsspektrum wie Kupfer wird besonders durch die Entwicklung der Weltwirtschaft beeinflusst und abgebildet [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009; Binder *et al.* 2008; Campbell 1999; Lucas *et al.* 2007]. Zudem wird der Kupferverbrauch auch als Indikator des Lebensstandards eines Landes und seiner technologischen Entwicklung verwendet [Arpaci 2000; Graedel und Cao 2010].

Der aktuelle Kupferverbrauch wird in der Literatur häufig in Kilogramm pro Kopf [$\text{kg} \cdot \text{capita}^{-1}$] angegeben und mit der Wirtschaftsleistung, gemessen als Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt (pro-Kopf-BIP [$\text{USD} \cdot \text{capita}^{-1}$]), in Bezug gesetzt [Gordon *et al.* 2006; ICSG 2010; The World Bank Group 2006; Tilton 2003]. Die Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen steigt mit zunehmender Bevölkerungszahl und realem Pro-Kopf-Einkommen [IIED 2002]. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 1-6 und Abbildung 1-7 verdeutlicht. Je mehr Menschen die Erde besiedeln, desto mehr steigt die Kupfernachfrage und somit auch die abgebaute Kupfermenge an. Neben dem Wachstum der Weltbevölkerung wird sich laut Expertenmeinung die Weltwirtschaft zum heutigen Stand in den kommenden 50 Jahren verdoppeln [Goldman Sachs 2007; OECD 2008]. Dabei wird ein besonders starkes Wachstum in den sogenannten *BRIICS* (Brasilien, Russland, Indien, Indonesien, China und Südafrika) stattfinden. Diese Länder fallen derzeit in die Kategorie der *wenig entwickelten* Länder.

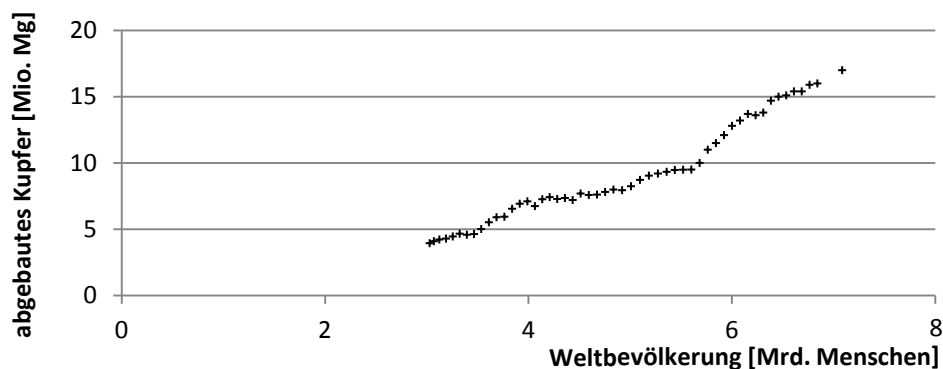


Abbildung 1-6: Zusammenhang zwischen der bisherigen jährlichen Weltbevölkerungszahl [Mrd. Menschen] und der weltweit abgebauten jährlichen Kupfermenge [Mio. Mg] seit 1960 [ICSG 2012; The World Bank 2013a]

Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) stellt die Wirtschaftskraft eines Landes bzw. der Welt dar. Ein Zuwachs des weltweiten BIPs erhöht die Kupfernachfrage, wenn auch nicht linear, und somit die weltweit abgebaute Menge an Kupfer (Abbildung 1-7) [Wellmer und Wagner 2006]. Besonders von 2003 auf 2004 hat das weltweite BIP mit 27 % stark zugenommen. Seit Anfang des 21. Jahrhunderts bis heute ist das weltweite BIP um 219 % gewachsen (Rauten in Abbildung 1-7). Selbst bei einem jährlichen Wachstum von 3,8 % in der Zukunft gehen Experten davon aus, dass sich die Weltwirtschaftsleistung bis 2030 um das 2,4-fache im Vergleich zu 2006 entwickeln wird [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009]. Im Zeitraum von 1995 bis 2003 stieg das weltweite BIP langsamer um insgesamt 12 % an, die abgebaute Kupfermenge hingegen um 38 %.

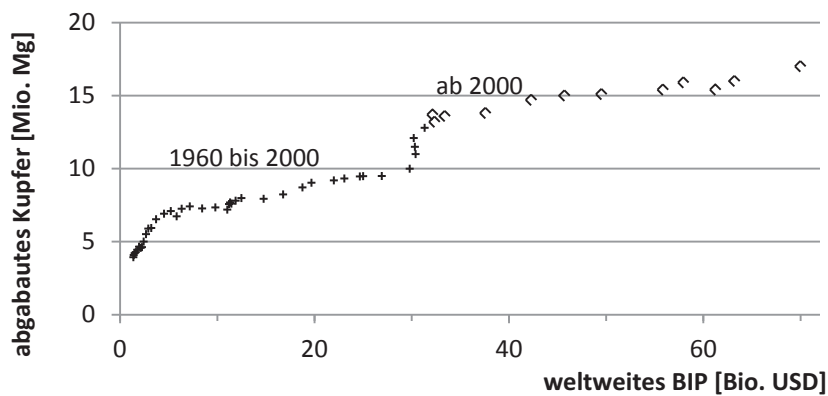
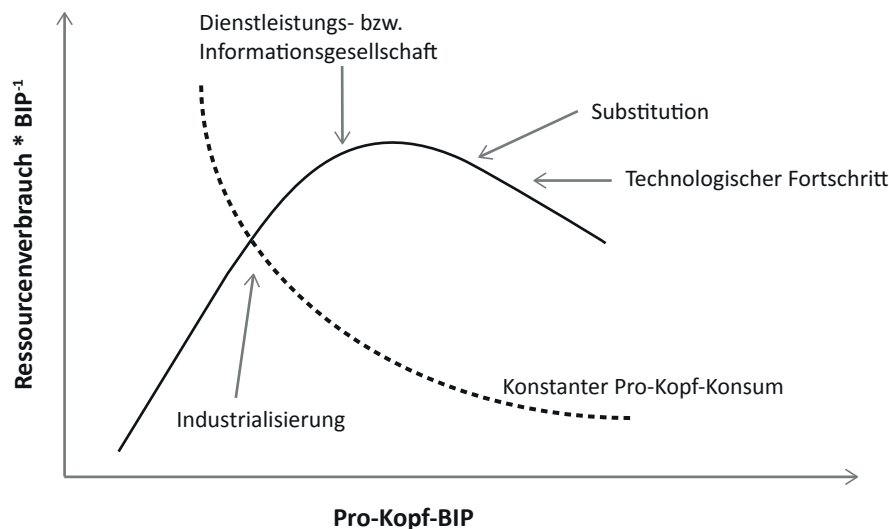


Abbildung 1-7: Verlauf der weltweit jährlich abgebauten Kupfermenge [Mio.Mg] in Abhängigkeit von der jährlichen Entwicklung des gesamten BIPs der Welt [Bio. USD] seit 1960 [ICSG 2012; The World Bank 2013b]

Der in Abbildung 1-7 und Abbildung 1-9 beobachtete Kurvenverlauf wird in der Literatur durch die Theorie und Hypothese der Metallnutzungsintensität (engl. *metal use intensity*) erklärt [Malenbaum 1978; Roberts 1996; Tilton 1990a]. Diese wird definiert als der Metallkonsum pro BIP-Einheit. Die Theorie besagt, dass die Metallnutzungsintensität durch eine Funktion des Pro-Kopf-Einkommens beschrieben und durch eine inverse U-Kurve abgebildet werden kann (Abbildung 1-8). Sie konnte durch diverse empirische Studien aus dem Bereich der Ressourcenökonomie belegt werden [Minerals Education Coalition 2012; Reck und Rotter 2012; van Vuuren *et al.* 2002].



**Abbildung 1-8: Nutzungsintensitäts-Hypothese [nach van Vuuren *et al.* 1999]
Entwicklung des Ressourcenverbrauchs in Abhängigkeit des BIPs durch gesellschaftlichem Wandel, Substitution sowie technologischem Fortschritt**

Der inverse U-Verlauf der Nachfragekurve (Abbildung 1-8 und Abbildung 1-9) lässt sich anhand von drei unterschiedlichen zeitlichen Trends erklären. Basierend auf der *Drei-Sektoren-Hypothese* von Jean Fourastié, wonach eine Verlagerung von dem primären Wirtschaftssektor (Agrarwirtschaft) zu dem sekundären (Industrie) hin zum tertiären Wirtschaftssektor (Dienstleistung bzw. Information) stattfindet [Fourastié 1949], verändert sich der Rohstoffbedarf aufgrund der zunehmenden Rohstoffverarbeitung und steigendem Einkommen erst ansteigend und dann aufgrund des gesellschaftlichen

Wohlstands abflachend [Tilton 1986; Wellmer und Wagner 2006]. Durch die Verwendung des Rohstoffs nimmt der Bedarf zu, stabilisiert sich dann und kann aufgrund von Substitution wieder zurückgehen. Auch technologischer Fortschritt kann durch effizienteren Materialeinsatz den Rohstoffkonsum minimieren. Die gestrichelte Linie in Abbildung 1-8 stellt eine Isolinie dar, die einen konstanten Pro-Kopf-Konsum des Metalls abbildet [van Vuuren *et al.* 2002].

Abbildung 1-9 zeigt, dass es einen signifikanten Einfluss des Pro-Kopf-BIPs von weniger bzw. mehr als 10.000 US-\$ auf den Pro-Kopf-Konsum gibt. Diese Beobachtung wird durch verschiedene Studien belegt [IIED 2002; Singer 2010]. Länder, die unter diesem Level liegen, weisen vorwiegend einen Kupferverbrauch von weniger als 5 kg auf (Abbildung 1-9). Oberhalb dieses Cut-Off Punktes wächst der Kupferverbrauch sehr diffus an. Grund hierfür ist, dass sich ab diesem Punkt bedeutende Industriebereiche entwickeln, um die Binnennachfrage ebenso wie den Exportmarkt bedienen zu können [IIED 2002]. Menschen mit einem steigenden Einkommen haben durchschnittlich einen größeren Rohstoffkonsum, so dass der große Nachfrageanstieg in den vergangenen Jahren von Ländern wie China und Indien stark beeinflusst wurde [Brewster 2009; Gordon *et al.* 2006]. Ab einem bestimmten Einkommenslevel steigt der Pro-Kopf-Konsum nur noch sehr wenig an bzw. geht wieder zurück, da die Nachfrage nach Kupferapplikationen stark abnimmt. Dies ist damit zu erklären, dass einerseits der Markt eine Sättigung erfährt und andererseits durch die stärkere Wirtschaftsleistung neue Technologien angewendet werden und somit eine Substitution stattfindet. Die These, dass der Metallkonsum und die Nutzungsintensität mit steigendem Pro-Kopf-Einkommen auch in Ländern mit einem geringem BIP zunimmt, konnte von Radetzki bestätigt werden [laut Tilton 1990b].

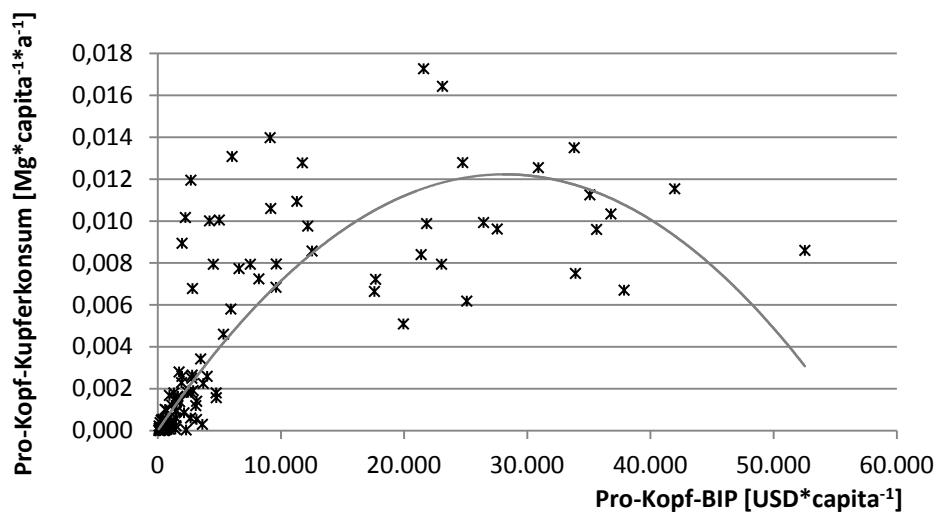


Abbildung 1-9: Verlauf und Entwicklung des historischen Pro-Kopf-BIPs und des Pro-Kopf-Kupferkonsums $[\text{Mg} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$ seit 1970 in den 17 der 20 bevölkerungsreichsten Ländern der Welt [Danielson 2010; Menzie *et al.* 2003; The World Bank 2013b] und die für SysCu verwendete Nachfragekurve

Bei Ländern mit mittlerem Einkommen (engl. *middle-income countries* = MIC) liegt der Pro-Kopf-Bestand im Laufe des Lebens bei 140 - 300 kg Cu. Zu den Länder mit mittlerem Einkommen, d. h. die ein jährliches Pro-Kopf-Einkommen zwischen 1.025 und 12.475 USD haben [Global Finance 2012], zählen derzeit 86 Staaten [Worldbank 2011]. In diese Kategorie fallen beispielsweise die BRIICS-Staaten. Rund die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Staaten mittleren Einkommens [Worldbank 2011]. Nach Klassifizierung der Weltbank haben Länder mit geringem Einkommen (engl. *low-income countries* = LIC) weniger als 1.025 USD*capita⁻¹ zur Verfügung. Afghanistan, Niger, Kenia und

Zentralafrika fallen in diese Kategorie [Global Finance 2012]. Der Pro-Kopf-Konsum wird auf durchschnittlich 30 - 40 kg Cu beziffert.

Tabelle 1-5 gibt einen Überblick über die historische Entwicklung des Metallkonsums nach Kontinenten. Generell wird bei dem Pro-Kopf-Konsum die Menge an produziertem und importiertem Metall erhoben, dabei wird jedoch nicht betrachtet, ob die Produkte auf dem Binnenmarkt verkauft oder exportiert werden [IIED 2002]. Von 1993 bis 2005 ist der Metallkonsum auf allen Kontinenten stark angestiegen. Diese Beobachtung ist konsistent mit den gestiegenen Produktionszahlen von Kupfer (Abbildung 1-2) und der gestiegenen weltweiten Wirtschaftskraft (Abbildung 1-9).

1980 wurden rund 68 % des weltweiten Kupferkonsums von Frankreich, Deutschland, Japan, dem Vereinigten Königreich und den Vereinigten Staaten von Amerika bestimmt [Singer 2010]. Im Jahr 2000 lag der Anteil dieser fünf Staaten lediglich noch bei 51 %. Singer geht davon aus, dass bis 2020 dieser Anteil auf 30 % sinkt [Singer 2010]. Laut Singer zählen dann China, Amerika, Indien, Japan und Brasilien zu den Hauptkupferkonsumenten.

Tabelle 1-5: Vergleich der Entwicklung der Metallkonsum-Intensität (Metall pro Einheit BIP) pro-Kopf von 1993 und 2005 nach Regionen [kg*capita⁻¹*a⁻¹]

Region	1993* [kg*capita ⁻¹]	2005** [kg*capita ⁻¹]
Nordamerika	5,8	6,7
Latein-Amerika	1,6	3
Westeuropa	6,4	9,1
Osteuropa		3,5
Asien	1,2	2,3
Afrika	0,1	k.A.

* [Yellishetty *et al.* 2011]

** [The World Bank Group 2006]

1.3.12 Technologischer Fortschritt

Eine Analyse des Fraunhofer Institutes bezüglich der Entwicklung von Zukunftstechnologien stellt heraus, dass der weltweite Kupferbedarf durch Innovationen, die Kupfer enthalten, basierend auf der Kupferproduktion von 2006 von 9 % auf zukünftig 24 % ansteigen könnte [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009]. Eine Auswahl an Zukunftstechnologien, die Kupfer als Rohstoff benötigen, zeigt, dass Kupfer vor allem in der Elektronik, bei Elektromotoren, Spulen und Drähten eine starke Verwendung finden wird [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009; Erdmann *et al.* 2011; Lucas *et al.* 2007]. Bis 2030 könnte sich der weltweite Fahrzeugbestand auf 1 Mrd. Fahrzeuge belaufen [Shell 2009]. Da die Hybridtechnologie als eine Zukunftstechnologie gesehen wird, die mehr als die doppelte Menge an Kupfer im Vergleich zu einem konventionellen PKW benötigt, ist davon auszugehen, dass der zukünftige Kupferbedarf zusätzlich ansteigt [Erdmann *et al.* 2011]. In konventionellen PKW sind rund 25 kg Cu verbaut, in Hybridautos hingegen zwischen 40 - 55 kg Cu [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009; Lucas *et al.* 2007].

1.3.13 Knappheit von Kupfer und Preisentwicklung

Das Thema Rohstoffverknappung ist seit mehr als 80 Jahren ein immer wiederkehrendes Thema. Bereits in den 1930er Jahren verwies Harold Hotelling auf den zu schnellen und nicht nachhaltigen Abbau und die Förderung von Ressourcen [Hotelling 1931]. Meadows unterstützte diese These in seiner kontrovers diskutierten Studie des Club of Rome namens *Limits to Growth* [Club of Rome and Meadows 1972]. Ziel der Modellierung war das Quantifizieren und Prognostizieren des weltweiten Rohstoffverbrauchs und seinen daraus resultierenden Auswirkungen. Als Basis für die Studienergebnisse wurde das *System Dynamics*-Modell *World3* verwendet. Die Studie stellte heraus, dass nicht erneuerbare Ressourcen wie Metalle oder fossile Energieträger zunehmend knapper werden. Als Folge des enormen Konsums wurde der Zusammenbruch des Systems simuliert. In den Folgejahren wurden die Modellparameter des *World3*-Modells den aktuellen Daten und Werten angepasst und verifiziert [Meadows 2004; Randers 2012]. Jedoch deuten auch diese aktualisierten Modellergebnisse auf eine zukünftige Rohstoffverknappung hin und prognostizieren ein Zuspitzen der globalen Rohstoffversorgung und die damit einhergehenden Umweltauswirkungen.

Als Indikator für die Knappheit eines Rohstoffes wird häufig die statische Reichweite angegeben [RWI Essen *et al.* 2006]. Sie drückt aus, wie lange es dauert, bis die aktuell sicheren bzw. wahrscheinlichen Vorräte (Reserven) bei einer konstanten Produktion erschöpft sind [Bardt 2008]. Experten gehen davon aus, dass innerhalb dieses Jahrhunderts eine Verknappung von Kupfer stattfinden wird [Gordon *et al.* 2006]. Bei der statischen Reichweite wird eine Momentaufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet, die sich jedoch durch einen höheren Verbrauch, verbesserte technische Fördermöglichkeiten, Recycling oder Substitution variabel und recht dynamisch entwickeln kann. Die statische Reichweite von Kupfer wird auf 25 bis 45 Jahre beziffert [BGR k. A.; Brewster 2009; ICA 2013; Tilton und Lagos 2007].

Aufgrund der Verschiebung und Instabilität des Marktgleichgewichts durch den enormen Konsumanstieg der letzten Dekade sind große Preissprünge und starke Volatilitäten für Kupfer zu beobachten [Bardt 2008; Labys 2006; Menzie *et al.* 2013; RWI Essen *et al.* 2006]. Abbildung 1-10 verdeutlicht diesen Trend. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich der Kupferpreis zeitweise verdreifacht bis verfünffacht. Trotz der Wirtschaftskrise 2008 und den daraus resultierenden enormen Kurseinbrüchen wird Kupfer der höchsten Reinheit (*copper grades A*) aktuell mit rund 7.000 USD*Mg⁻¹ an der London Metal Exchange (LME) gehandelt.

Die Kupferpreiselastizitäten von Angebot und Nachfrage sind generell gering [Fisher *et al.* 1972; Gómez *et al.* 2007; Slade 1982; Valencia 2005; Vial 1988; Vial 2004]. Das kurzfristige Kupferangebot ist aufgrund langandauernder Explorationsvorhaben von 10 bis 15 Jahren sehr unelastisch. Ebenso verhält es sich bei der Nachfrage, da viele Industriebereiche langfristig planen und produzieren. Somit ist eine schnelle Variation der verwendeten Rohstoffe mittels Substitution nicht möglich. Gründe für die starken Kupferpreisvolatilitäten der vergangenen Jahre sind neben den geringen Angebots- und Nachfrageelastizitäten deutliche Zeitverzögerungen zwischen dem Beginn und der Umsetzung von Explorationsvorhaben und deren Investments [Papp *et al.* 2008; Slade 1982]. Auf lange Sicht von mehr als 100 Jahren haben die Investmentaktivitäten oder Wirtschaftszyklen keinen relevanten Einfluss bei der Preisentwicklung [Papp *et al.* 2008; Slade 1985].

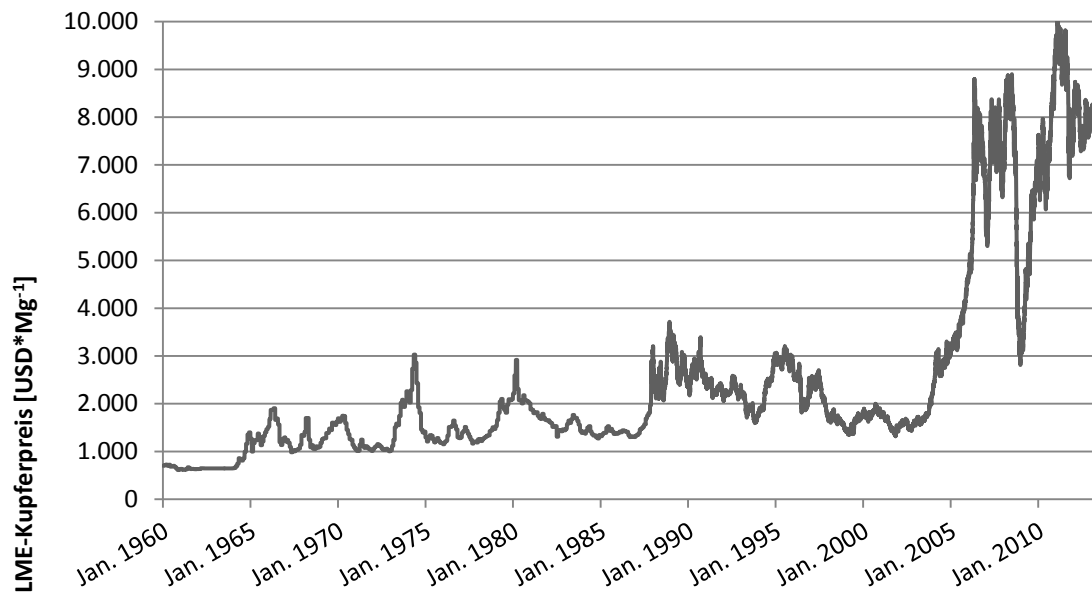


Abbildung 1-10: Historische Entwicklung des London-Metall-Exchange-Kupferpreises Cash Grade A (Minimum 99,9935 % Reinheit) in Monaten seit Januar 1960 [Thomson Reuters Datastream 2013]

Ashby zeigt Parameter auf, welche die Kritikalität von Rohstoffen in Zusammenhang mit der Preisentwicklung ausdrücken [Ashby 2012a]. Die Ressourcen stellen ein endliches Lager dar. Die Reserve variiert je nach technologischem Fortschritt, neuen Explorationen, Preisentwicklungen etc. Zu Beginn liegt ein exponentielles Wachstum vor, welches, nachdem die entdeckten Vorkommen immer kleiner werden, stark abflacht. Die Produktionsrate liegt dann gesättigt vor und beginnt zu fallen, da die Reserven immer weiter erschöpft werden und ein weiterer Abbau mit großen zusätzlichen Anstrengungen und Materialeinsatz verbunden ist. Dies hat einen starken Preisanstieg zur Folge.

1.4 Forschungsziele

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systemverständnisses für das Rohstoffsystem Kupfer. Dabei soll mithilfe einer geeigneten Methodik das hochkomplexe Rohstoffsystem Kupfer abgebildet werden. Neben dem Herausarbeiten signifikanter Parameter, die das Systemverhalten maßgeblich beschreiben und bedingen, sollen deren Rückkopplungen berücksichtigt werden. Dabei spielen zeitliche Verzögerungen eine entscheidende Rolle und sollen implementiert werden. Die Eigendynamik des Systems soll visualisiert werden. Einerseits gilt es, die Theorie mit der Systematik Rohstoffmanagement synergetisch zu verknüpfen, andererseits soll ein direkter praktischer Bezug erfolgen.

Eine Verknappung des Basismetalls Kupfer könnte drastische Auswirkungen auf den gesellschaftlichen Wohlstand haben. Es soll eine Alternative zur statischen Reichweite entwickelt werden, die neben dem Primär- auch den Sekundärkreislauf in vollem Umfang berücksichtigt. Da der Faktor Zeit von großer Bedeutung ist, soll ein dynamisches Modell entwickelt werden, welches nicht-lineare Zusammenhänge, wie sie in der Umwelt häufig vorkommen, adäquat abbildet. Mithilfe dieses Modells können dann Aussagen über mögliche zukünftige Kupferverknappungen getroffen werden. Durch unterschiedliche Szenarien kann eine Abschätzung getroffen werden, inwiefern die geogenen primären Kupfervorkommen in den kommenden Jahren erschöpft sind und in wieweit durch eine Erhöhung der Recyclingquote bzw. der Produktlebenszyklen dem entgegengewirkt werden kann.

Ein weiterer Forschungsaspekt ist die Betrachtung der *Stillen Reserve* als potenzielles Rohstofflager. Da diverse Studien davon ausgehen, dass sich ein Großteil des bisher abgebauten Kupfers in Nutzung befindet bzw. in anthropogenen Minen lagert, ist es von Interesse, welche Potenziale theoretisch vorhanden sind und ob *Urban Mining* bzw. *Landfill Mining* eine Möglichkeit zur Rohstoffsicherung bilden können.

Zusammenfassend lassen sich folgende Forschungsschwerpunkte darlegen:

- Erarbeitung einer geeigneten Methodik zum Abbilden des dynamischen Rohstoffsystems Kupfer;
- Entwicklung eines dynamischen Modells zum Abbau und zur Verwendung von Kupfer unter Berücksichtigung der Unsicherheit von globalen Ressourcenmengen, der unterschiedlichen Kupferapplikationen, Recyclingquoten, Produktlebenszyklen und der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung,
- Potenzielle Szenarien zur Kupferverwendung;
- Analyse der Menge an Sekundärkupfer, die potenziell dem Stoffkreislauf zugeführt werden kann, und Darlegung möglicher Optionen zur Sicherung des Kupferangebotes.

Das Modell soll ein umfassendes Systemverständnis generieren und das Verhalten des globalen Kupfermarktes erklären. Ziel ist ein simplifiziertes Modell zu entwickeln, welches auch auf andere metallische Rohstoffe angewendet werden kann und ohne großen Modellierungsaufwand eine Aussage zu Verknappungsszenarien nicht regenerativer metallischer Ressourcen ermöglicht. Das Modell soll keine exakten Prognosen bezüglich des globalen Kupferangebotes und der -nachfrage liefern, sondern vielmehr generelle Trends beschreiben und dynamische sowie zeitliche Aspekte hinreichend berücksichtigen.

*"[System thinking is] the art and science
of making reliable inferences about behavior
by developing an increasingly deep
understanding of underlying structure."*

[Richmond 1994]

2 Methoden

In diesem Teil der Arbeit geht es um die Definition von Begrifflichkeiten und Grundlagen, die die *System Dynamics*-Methodik betreffen. In den folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über die historische Entwicklung, die Theorie und praktische Umsetzung von *System Dynamics* gegeben. Dabei werden die Modellierungsschritte und die zugrunde liegenden Annahmen und Voraussetzungen erläutert. Im letzten Abschnitt wird auf die Implementierung der *System Dynamics*-Methodik für globale Kupfermarktmodell SysCu eingegangen. Neben den Systemelementen werden die Modellstruktur und die mathematischen Verknüpfungen dargelegt.

2.1 Grundlagen von *System Dynamics*

2.1.1 Begriffserklärungen

Systeme

Der Systembegriff bildet das Fundament der allgemeinen Systemtheorie, die als formale Wissenschaft von Struktur, Verknüpfungen und Verhalten von Systemen verstanden wird [Ulrich 1970]. Ein System stellt eine Gesamtheit von Elementen dar, zwischen denen Beziehungen bestehen bzw. hergestellt werden können, die aufgrund eines bestimmten Zwecks miteinander operieren [Forrester 1972; Matthies 2002].

"Ein System ist eine Ansammlung von Dingen - Menschen, Zellen, Molekülen oder sonst etwas - die so miteinander verknüpft sind, dass sie ein für dieses System charakteristisches Zeitverhalten hervorbringen. Das System kann von äußeren Einwirkungen hin und her

geworfen, in seinem Verhalten eingeschränkt, erregt oder angetrieben werden."
[Meadows und Wright 2010]

Demnach existieren Systeme in einer bestimmten Systemumgebung, abgetrennt von der Systemgrenze, und weisen folgende Merkmale auf [Bossel 2004]:

- erfüllen eine bestimmte Funktion, die sich mittels Systemzweck definieren lässt;
- Systemfunktion wird durch Systemelemente und Wirkungsverknüpfungen (Rückkopplungen, engl. *feedback*) dargestellt;
- bei Zerstörung der Systemintegrität geht die Systemidentität verloren. Somit ist ein System nicht teilbar, ohne dass Systemzweck bzw. -funktion verändert oder zerstört wird.

Die Struktur eines dynamischen Systems besteht aus Systemgrenzen, Teilsystemen und den Elementen der Teilsysteme. Das Systemverhalten wird durch die Art der Beziehungen und der Verknüpfungen charakterisiert [Feess 2012]. Basis für die Erklärung des Verhaltens ist die Anwendung von interdisziplinären Erkenntnismodellen. Durch eine Analyse von Strukturen und Funktionen kann eine Vorhersage über das Systemverhalten erfolgen. Der Standpunkt des Betrachters spielt bei der Klassifizierung des Systems eine entscheidende Rolle, sprich welcher Zweck fokussiert werden soll [Forrester 1972]. Die Systemabgrenzung ist maßgeblich von dem Beschreibungszweck des Systems abhängig.

Es wird zwischen zwei Arten von Systemen unterschieden: *offene* und *geschlossene* Systeme [Forrester 1972; Sterman 2000]. Ein *offenes* System ist charakterisiert durch einen Strom von Outputs, die auf die vorangegangenen Inputs reagieren, allerdings keinen Einfluss auf diese Inputs besitzen. Das System reagiert zukünftig und steht mit seiner Umgebung in ständiger Wechselwirkung. Ein *geschlossenes* System, auch Rückkopplungssystem genannt, wird durch das eigene vergangene Verhalten beeinflusst. Vorangegangene Handlungen werden als Informationskriterien für zukünftige Ereignisse verwendet.

Zustandsgrößen

Größen, die eine umfassende Beschreibung des Systems ermöglichen, werden Zustandsgrößen genannt. Mithilfe von Zustandsgrößen kann jederzeit der Systemzustand abgelesen werden [Bossel 2004; Matthies 2002]. Sie werden häufig als "Gedächtnis" des Systems verstanden, die im Zeitverlauf ihren "Inhalt" verändern und somit Zustandsänderungen über einen längeren Zeitraum abbilden.

Zustandsgrößen sind voneinander unabhängig, so dass eine nicht durch eine Kombination anderer Zustandsgrößen erklärt werden kann [Bossel 2004]. Jede einzelne Zustandsgröße ist somit essentiell für das Systemverhalten. Zustandsänderungen treten durch Einwirkungen oder Prozesse innerhalb des Systems auf.

Feedback-Strukturen

Von Rückkopplungen (engl. *feedback*) ist die Rede, wenn sich Zustandsgrößen auf die Zustandsänderungen auswirken und ein spezifischen Systemverhalten auslösen [Bossel 2004]. Sie entwickeln somit eine Eigendynamik, die zum Teil zu nicht mehr genau vorhersagbarem Verhalten führt. Für das Systemverständnis komplexer Systeme ist eine genaue Analyse der Wirkungsstrukturen (engl. *feedback-loops*) unumgänglich. Aufgrund von unterschiedlichen Rückkopplungen steigt die Komplexität des Systemverhaltens.

Rückkopplungen beziehen sich auf den Zustand einer Variable X, welche Y beeinflusst und umgekehrt. Dies geschieht in Folge einer Aneinanderkettung verschiedener Effekte und Reaktionen. Wie X auf Y und Y auf X wirkt, darf nicht unabhängig voneinander analysiert werden. Geschieht dies dennoch, werden fehlerhafte Voraussagen darüber getroffen, wie sich das System in Zukunft verhalten wird [Márquez 2009]. Rückkopplungen können sowohl eskalierende Wachstums- oder Schrumpfungsprozesse (*positive Rückkopplungen*) als auch zielsuchende, oszillierende bzw. stabilisierende Schwingungen (*negative Rückkopplung*) beinhalten [Kapmeier 1999]. Ein Wirkungsdiagramm (engl. *causal loop diagram*) stellt durch Pfeile dar, welche Komponenten eines Systems sich gegenseitig beeinflussen und Rückkopplungen implementieren [Desch und Probst 2006]. Genauer Ausführungen hierzu werden in Kapitel 2.2.2 behandelt.

Modell

Unter einem Modell wird ein abstrahiertes Abbild der Wirklichkeit verstanden [Forrester 1972; Sterman 2000]. Modelle sollen die Realität vereinfacht und auf das Wesentliche reduziert darstellen. Den Anspruch von Vollkommenheit sollen Modelle nicht erfüllen [Bossel 2004]. Rahmandad und Sterman definieren ein *System Dynamics*-Modell als eine mathematische Darstellung eines sozialen Systems, welches durch Simulation numerische Ergebnisse generieren kann [Rahmandad und Sterman 2012]. Modelle besitzen immer einen Modellzweck [Russenberger 1998]. Je nachdem wie dieser Modellzweck lautet, wird zwischen Beschreibungs-, Erklärungs- und Entscheidungsmodellen unterschieden [Mohapatra *et al.* 1994]. Bei Beschreibungsmodellen soll das System abgebildet werden. Erklärungsmodelle haben den Anspruch, Wirkzusammenhänge und Verhalten neben der Beschreibung auch zu erklären. Von Entscheidungsmodellen ist die Rede, wenn mithilfe des Modells Handlungsanweisungen (engl. *policy*) generiert werden.

Bei der Typisierung von Modellen wird zwischen *mental*en und *mathematisch-analytischen Modellen* differenziert [Forrester 1962; Strohhecker 2008]. Häufig ist der Übergang von *mental*en zu *mathematisch-analytischen Modellen* fließend, da beide Formen meist kombiniert werden [Russenberger 1998]. *Mentale Modelle* dienen dem Verständnis, welches sich Lebewesen aufgrund ihres Bewusstseins von der sie umgebenden Umwelt machen [Ford 2010]. Bei *mental*en Modellen werden die Elemente, die Beziehungen etc. kommuniziert, eine Darstellung in Form von Formeln, Gleichungen etc. ist hierbei jedoch nicht vorgesehen [Strohhecker 2008]. *Mentale Modelle* werden oft verbalisiert und gelangen daher schnell an die Kapazitätsgrenze, so dass eine umfassende und detaillierte Betrachtung von diversen Aspekten aufgrund der kognitiven Beschränkung nicht umfänglich möglich ist [Ford 2010; Sterman 2000; Wagner 2004]. Durch das Zusammenfügen einzelner *mentaler Modelle* kann ein Gesamtmodell erzielt werden, so dass eine ganzheitlichere Betrachtungsweise gewährleistet werden kann. Bei *mathematisch-analytischen Modellen* kann die Darstellung mit Hilfe von Formeln und Symbolen erfolgen [Bossel 2004; Strohhecker 2008]. Dadurch ist eine präzise und objektive Beschreibung möglich, da die Beziehungen zwischen den Systemelementen erkennbar sind und überprüft werden können. Bei *mathematisch-analytischen Modellen* kann zwischen *statischen* und *dynamischen* unterschieden werden [Russenberger 1998]. Bei *dynamischen Modellen* wird die Zeit explizit berücksichtigt. Die Linearität bzw. Nichtlinearität ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Modellen [Meadows und Wright 2010]. Lineare Systeme weisen die Eigenschaft auf, auf die Änderung eines Parameters stets mit einer dazu proportionalen Änderung eines anderen Parameters zu reagieren. Nichtlinearität beinhaltet, dass nicht alle Systemreaktionen proportional zueinander sind.

Dynamik und Komplexität

Zeitliche Veränderung wird als Dynamik verstanden [Ford 2010]. Dynamische (deterministische) Systeme sind mathematische Modelle zeitabhängiger Prozesse [Birkhoff *et al.* 1986; Meadows und Wright 2010]. Die Begrifflichkeit dynamischer Systeme geht auf den Mathematiker George David Birkhoff zurück.

Komplexität wird definiert als eine Vielfältigkeit von Zuständen und Zustandskonfigurationen, die aus Beziehungen untereinander hervorgehen und einen zeitlichen Ablauf beinhalten [Ulrich 1970]. Ein komplexes System setzt sich aus sehr vielen, verschiedenartigen Elementen zusammen, mit zum Teil sehr speziellen Funktionen, die hierarchisch organisiert und miteinander verknüpft sind [Rosnay 1979]. Bei komplexen Systemen sind die Wechselwirkungen der Elemente meist nicht-linear. Mit steigender Anzahl von Elementen und voneinander abhängigen Rückkopplungen sowie nicht-linearer und dynamischer Verhältnisse steigt demnach die Komplexität eines Systems an [Matthies 2002; Mohapatra *et al.* 1994].

Forrester vertritt die Meinung:

"Komplexe Systeme verlaufen gegen unsere Intuition, was Fehler zur Folge hat."
[Forrester 1969]

Dynamische Komplexität entsteht laut Sterman, da Systeme variieren, die "Spieler" miteinander bzw. mit ihrer Umwelt agieren und somit Rückkopplungen implementieren [Sterman 2001]. Nichtlinearität und die Eigenorganisation anhand interner Strukturen sind weitere Aspekte für Komplexität.

Ebenfalls hat die Vergangenheit Einfluss auf das System und sein Verhalten. Hinzu kommen Adaption, Zeitverzögerungen und kontraintuitives Verhalten, die Systeme dynamisch und komplex werden lassen. Eine organisierte Komplexität gilt als gegeben, wenn Wechselwirkungen (Interaktionen) zwischen Einzelphänomenen bestehen [Rosnay 1979; Wenzel 2012].

Simulation

Eine Simulation ist ein Vorgang einer Schritt-für-Schritt-Lösung zur Analyse komplexer Systeme [Meadows und Wright 2010]. Das Verhaltensmuster eines Systems wird pro Zeiteinheit akkumuliert, so dass für die Berechnung des Gesamten alle Zwischenstadien durchschritten werden müssen [Forrester 1972]. Das Ziel der Modellsimulation ist die Gewinnung von zuverlässigen validen Verhaltensbeschreibungen der Realität und eine Verbesserung des Systemverständnisses [Bossel 2004; Kapmeier 1999; Matthies 2002].

2.1.2 Systemtheorie und Kybernetik

Die Grundlagen des Systemansatzes *System Dynamics* sind die Kybernetik und die Systemtheorie [Rosnay 1979]. Um immer komplexer werdenden Problemen mit ganzheitlichen Lösungsansätzen begegnen zu können, wurde nach dem Zweiten Weltkrieg die Wissenschaft der Kybernetik und Systemtheorie entwickelt [Buteweg, 1988 zitiert nach Bluma 2005]. Zu den bedeutendsten Männern im Zusammenhang mit Kybernetik und Systemtheorie zählen der Mathematiker Norbert Wiener (†1964), der Neurophysiologe Warren McCulloch (†1969), der Systemwissenschaftler Jay Wright Forrester und der Biologe Ludwig von Bertalanffy [Niemeyer 1977; Rosnay 1979]. Bertalanffy sah bei einer Betrachtung der Grundphänomene des Lebens eine monokausale Perspektive und lineare

Beziehungen als unzureichend zur Systembeschreibung an [Matthies 2002]. Wiener prägte den Begriff *Regelkreis* (Rückkopplung, engl. *feedback system*). Sowohl die Systemtheorie als auch die Kybernetik können als interdisziplinäre Theorieansätze betrachtet werden.

Die Systemtheorie wird als eine formale Wissenschaft von Strukturen, Verknüpfungen und dem Verhalten von Systemen beschrieben [Ulrich 1970]. Sie stellt die strukturellen Aspekte eines Systems heraus und versucht eine ganzheitliche Sichtweise zu gewährleisten [Schade 2005]. Kybernetik befasst sich mit der Theorie der Regelung und Steuerung von dynamischen Systemen und der Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und den von Menschen geschaffenen Maschinen [Bluma 2005; Rosnay 1979; Wenzel 2012]. Bei der Kybernetik liegt der Fokus als rein formale Theorie auf der Kommunikation und Regelung komplexer, sich selbst regulierender Systeme [Mohapatra *et al.* 1994].

Kernbegriffe beider Wissenschaften sind:

- System
- Feedback (Rückkopplung)
- Adaption (Anpassung)
- Ist- und Sollwert
- Rezeptor und Effektor
- Varietät

Die Kybernetik kommt primär von der Lenkungsproblematik und der Information (analytischer Ansatz), während bei der Systemtheorie eher eine Teile-Ganzheit-Problematik auftritt (systematischer Ansatz) [Bluma 2005; Rosnay 1979; Wenzel 2012]. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Aspekte des systemischen und analytischen Ansatzes. Bei einem systemischen Ansatz sollen komplexe Systeme mit dem Ziel einer ganzheitlichen Betrachtung bezüglich Komplexität und Dynamik fokussiert werden [Rosnay 1979]. Im Gegensatz dazu werden beim analytischen Ansatz die Elemente detailliert untersucht und ihre Wechselwirkungen betrachtet. Beide Ansätze sind sich gegenseitig ergänzende Methoden und finden bei *System Dynamics* Anwendung [Schiemenz 1993; Ulrich 1970].

Tabelle 2-1: Vergleich eines analytischen und systemischen Ansatzes [Forrester 1972; Rosnay 1979]

	Analytischer Ansatz	Systemischer Ansatz
Betrachtungsweise	Isolierend	Verbindend
Berechnungsschritt	Beurteilung des zukünftigen Systemzustands, ohne die dazwischenliegenden Systemzustände zu berechnen	Berechnung jedes einzelnen Systemzustands (<i>TIME STEP</i>)
Elemente	Konzentration auf einzelne Elemente	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Elementen
Wechselwirkungen	Untersuchung der Art der Wechselwirkungen	Ergebnisse der Wechselwirkungen
Detailtiefe	Genaueste Detailbetrachtung	Globale Betrachtungsweise
Modifizierung	Detailbetrachtung und jeweilige Modifizierung einer Variablen (<i>ceteris-paribus</i> -Untersuchung)	Modifizierung von Gruppen aus mehreren Variablen
Dauer und Reversibilität	Betrachtete Erscheinungen sind unabhängig ihrer Dauer reversibel	Integration von Dauer und Irreversibilität
Bewertung	Aufbauend auf einer Theorie werden Experimente durchgeführt und ausgewertet	Die Bewertung der Ergebnisse resultiert aus dem funktionellen Vergleich des Modells mit der Realität
Präzision	Präzise und detaillierte, aber nur mit großen Schwierigkeiten für Aktionen nutzbare Modelle wie ökonomische Modelle	Modelle, die als Wissensgrundlagen nicht ausreichend sind, aber nutzbar für Entscheidungen und Aktionen sind (wie <i>World3</i> s. Kapitel 2.1.4)
Linearität	Wirksamer Ansatz, solange die Wechselwirkungen linearer Art oder schwach sind	Nutzbarer Ansatz bei nicht-linearen und starken Wechselwirkungen
Disziplinarität	Innerhalb von Einzeldisziplinen fassbar	Interdisziplinär
Handlungsempfehlung	Führt zu detaillierten, festgelegten Handlungen	Führt zu zielgerichteten Handlungen
Kenntnisstand	Detailkenntnisse mit schlecht definierten Zielen	Kenntnisse der Ziele bei unbestimmten Details

2.1.3 Definition und Begriffsabgrenzung von *System Dynamics*

System Dynamics stellt eine Methodik dar, welche eine operative Umsetzung der Systemtheorie ermöglicht [Forrester 1962; Forrester 1972]. *System Dynamics* ist eine Methodik zur Modellierung, Simulation, Analyse und Gestaltung von dynamisch-komplexen Sachverhalten, die in den 1950er Jahren am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wurde [Grösser 2012]. Das Augenmerk liegt auf dem Prozess der Rückkopplung, welcher ein Kernelement von *System Dynamics* darstellt. Mithilfe dieser Methode können sozio-ökonomische, technische oder ökologische Systeme, basierend auf einem kybernetischen Modellansatz, dargestellt und simuliert werden [Niemeyer 1977].

Um eine einheitliche und allgemeingültige Definition von *System Dynamics* zu erhalten, werden die in der Literatur vorherrschenden Begriffsbestimmungen aufgezeigt. Diese ergeben sich aus den jeweiligen Forschungsschwerpunkten der einzelnen Wissenschaftler.

Forrester erläutert *System Dynamics*, damals noch unter *Industrial Dynamics* bekannt, wie folgt:

"Industrial Dynamics is the investigation of the information-feedback character of industrial systems and the use of models for the design of improved organizational form and guiding policy." [Forrester 1962]

Wolstenholme versteht unter *System Dynamics*:

"A rigorous method for qualitative description, exploration and analyses of complex systems in terms of their processes, information, organizational boundaries and strategies; which facilitates quantitative simulation modeling and analyses for the design of system structure and control." [Wolstenholme 1990]

Hayward gibt folgende Definition:

"System Dynamics is a methodology to analyze situations that change over time. It is widely known to analyze a wide range of systems in, for example, business, ecology, and social systems as well as engineering. The methodology focuses on the way one quantity can affect others through the flow of physical entities and information." [Hayward 2000]

Mohapatra et al. legen fest:

"System Dynamics (SD) is a methodology whereby complex, dynamic and nonlinear interactions in social systems can be understood and analyzed, and new structures and policies can be designed to improve the system behavior." [Mohapatra et al. 1994]

Richardson definiert *System Dynamics* folgendermaßen:

"System Dynamics is a computer-aided approach to policy analysis and design. It applies to dynamic problems arising in complex social, managerial, economic, or ecological systems — literally any dynamic systems characterized by interdependence, mutual interaction, information feedback, and circular causality." [Richardson 2009]

Grösser stellt folgende Begriffserklärung heraus:

"In der Forschung wird System Dynamics als eine Strukturmethode zur kausalen Analyse von Zeitreihen verwendet. Ein Forscher versucht die Zeitreihen durch Kausalmodelle (dynamische Hypothesen) und Simulationsmodelle zu erklären. Die dafür verwendete mathematische Formulierung als ein System von Differenzialgleichungen erhöht den Grad der Zuverlässigkeit der aufgestellten Hypothesen bzw. Modelle. Die modellierten Kausalstrukturen stammen aus qualitativen und quantitativen empirischen Analysen." [Grösser 2012]

Zusammenfassend lässt sich definieren, dass *System Dynamics* eine computerbasierte Methode zur Theoriebildung, Analyse und strategischen Entscheidungsfindung, welche sich aus einer endogenen Betrachtungsweise entwickelt, ist. Dies gilt für dynamische Probleme in komplexen sozialen, betriebswirtschaftlichen oder ökologischen Systemen. Es gilt: Alle dynamischen Systeme, welche durch Interdependenzen, wechselseitige Interaktion, Informationsrückkopplung und zirkuläre Kausalität gekennzeichnet sind, können durch *System Dynamics* beschrieben werden [Richardson 2009]. *System Dynamics* wird als umfassende Wissenschaft verstanden, bei der das Verstehen, das *operational thinking*, im Vordergrund steht [Olaya 2012; Richmond 1993]. Eine alleinige Datenanalyse erklärt

nicht, warum ein System wie agiert, sondern vielmehr sind die Resultate von Ereignissen für das Systemverhalten von Relevanz.

2.1.4 Historie von *System Dynamics*

Begründer war der Amerikaner Jay Wright Forrester, Professor an der Sloan School of Management am MIT, der dort 1956 eine "System Dynamics Group" ins Leben rief [Forrester 1996; Meadows 1980]. Im Jahr 1961 etablierte er die *Dynamik industrieller Vorgänge* (engl. *industrial dynamics*), welche Wirtschaftsunternehmen als kybernetische Systeme betrachtet, um so ihr Verhalten mithilfe von mathematischen Modellen zu simulieren und deren mögliche Entwicklungen beschreiben zu können [Forrester 1962; Rosnay 1979].

Wenige Jahre später folgte *Urban Dynamics* [Rosnay 1979]. Es verknüpft die industrielle und städtische Dynamik zu einer vollständig neuartigen Disziplin, welche ein mathematisches Weltmodell umfasst und als *World Dynamics* veröffentlicht wurde [Forrester 1971]. Diese Arbeit war Grundlage für die Trendanalyse von Dennis H. Meadows und das *World3*-Modell der Studie *Limits to Growth* (deutsch: *Grenzen des Wachstums*) [Club of Rome und Meadows 1972]. In dieser Publikation wurden mithilfe des *World3*-Modells der globale Rohstoffverbrauch, die Bevölkerungsentwicklung sowie die Umweltverschmutzung prognostiziert und einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. *System Dynamics* erlangte durch diese Studie weltweit große Bekanntheit.

Forresters Ziel war es, mithilfe von *System Dynamics* Strukturen zu definieren, die durch eine spezialisierte Simulationssprache namens DYNAMO (**D**ynamics **M**odels) eine Chance bietet, Berechnungen schnell und möglichst einfach zu erzielen [Coyle 1996] (mehr dazu in den folgenden Unterkapiteln).

2.1.5 Theoretische Grundlagen von *System Dynamics*

Ein Kernelement der *System Dynamics*-Methodik ist, Variablen in mathematischen Gleichungen, Bestands- (engl. *stock*) und Flussgrößen (engl. *flow*) sowie deren kausale Beziehung anhand kurz-, mittel- und langfristiger Schleifen (engl. *causal loops*) abzubilden [Jäger *et al.* 2009]. Hauptkennzeichen dieser Modelle sind, dass interdisziplinäre und dynamische Kausalbeziehungen wiedergegeben werden können [Kapmeier 1999; Matthies 2002]. Es ist sowohl eine qualitative als auch quantitative Analyse komplexer Systeme möglich. Im Hinblick auf die angewendete Integration über die Zeit (Digitalsimulation) haben die einzelnen Gleichungen stets die mathematische Form von Differentialgleichungen [Niemeyer 1977].

Da eine rein mentale Erfassung und Simulation von komplexen Systemzusammenhängen aufgrund der kognitiven Kapazitäten des menschlichen Verstandes im Sinne der *bounded rationality* begrenzt ist, kann *System Dynamics* das Verständnis eines Vorgangs unterstützen [Biber 2011; Sterman 2000]. Forrester betont, dass eine objektive Modellvalidität auf getroffenen Grundannahmen basiert, die nicht vollständig hinterfragt werden können [Forrester 1962]. Somit folgt der *System Dynamics*-Ansatz nicht der weit verbreiteten wissenschaftlichen Diktion einer empirischen Beweisführung [Bommer 2010].

System Dynamics umfasst vier theoretische Grundlagen [Milling 1974; Schade 2005]:

- **Informations-Rückkopplungs-Theorie**

Das Verhalten eines komplexen Systems ist primär von Rückkopplungen zwischen den Elementen des Systems geprägt. Rückkopplungen finden statt, wenn ein Systemelement Auswirkungen auf mindestens ein anderes Systemelement besitzt und dieses wiederum Einfluss auf das sich ursprünglich ändernde Element hat.

- **Entscheidungstheorie**

Diese Theorie wurde bei der Forschung zur langfristigen Militärstrategieplanung entwickelt und getestet. Mittels Beschreibung und mathematischer Formulierung wird es ermöglicht, Elemente eines Systems zu simulieren und somit Strategien über einen kompletten Simulationsablauf zu bewerten.

- **Mentale Problemlösungsprozesse**

Beim mentalen Problemlösungsprozess werden subjektive Komponenten, sogenannte "weiche Faktoren", in die Modellentwicklung einbezogen. Diese sind meist nicht oder nur schwer zu erfassen, nehmen aber dennoch Einfluss auf das Modell. Die Simulationstechnik dient der Bearbeitung von komplexen, analytisch nicht-lösbaren Gleichungssystemen.

- **Experimentelle Computersimulation**

Mithilfe von leistungsfähigen Rechnern ist es möglich auch hoch komplexe Modelle abzubilden und nicht-lineare, dynamische, mathematische Beziehungen zwischen den Systemelementen zu verarbeiten.

2.2 System Dynamics-Modellentwicklung

System Dynamics-Modelle sind interaktive, nicht-lineare Systeme mit folgenden Eigenschaften, bei denen die Komponente Zeit besondere Berücksichtigung findet [Milling 1974; Sterman 2002]:

- dynamisch
- enge Verknüpfungen
- Feedback-Strukturen und Interdependenzen
- Selbstorganisation
- adaptiv
- sich entwickelnd
- Programmierbarkeit und Rechenbarkeit.

Ziel von *System Dynamics*-Modellen ist ein zuverlässiges Systemverhalten zu generieren. Ein wichtiger Unterschied von *System Dynamics*-Modellen und der Realität ist, dass bei *System Dynamics* mathematische Formeln die Umwelteinwirkungen, Systemelemente und Systemverhalten darstellen [Bossel 2004]. Der Systemzustand wird durch die Zustandsgrößen (engl. *stock, level*) dargestellt [Sterman 2000]. Durch sie kann zu jedem Zeitpunkt der Systemzustand komplett ermittelt werden. Die Zustandsgrößen sind Akkumulationen von den vorausgegangenen Veränderungen des Systems [Milling 1974]. Aus mathematischer Sicht wird dies durch Integration erzielt. Die Flüsse (engl. *flow, rate*) stellen hierbei die Integranden dar. Die Integralgleichungen werden durch Differentialgleichungen erster Ordnung approximiert. Eine detailliertere Beschreibung erfolgt in Kapitel 2.2.3. Da die *System Dynamics*-Methodik auf Computersimulationen basiert, erfolgt die Modellierung häufig mithilfe spezieller *System Dynamics* Software (DYNAMO, Powersim, Vensim, STELLA, iThink, Anylogic etc.).

Die Vorgehensweise beim Modellieren findet nach folgenden Prozessschritten statt (Abbildung 2-1), die in den nachstehenden Unterkapiteln detailliert beschrieben werden:

- Problemspezifikation
- Qualitativer Entwurf
- Quantitativer Entwurf
- Validierung
- Evaluation

Diese Modellierungsphasen finden meist in einem iterativen Prozess statt. Im Laufe dieses Prozesses entstehen anwendungsfähige systemdynamische Modelle des realen Systems [Bossel 1994a].

Sterman beschreibt die Modellentwicklung wie folgt:

"The art of model building is knowing what to cut out, and the purpose of the model acts as the logical knife." [Sterman 2000]

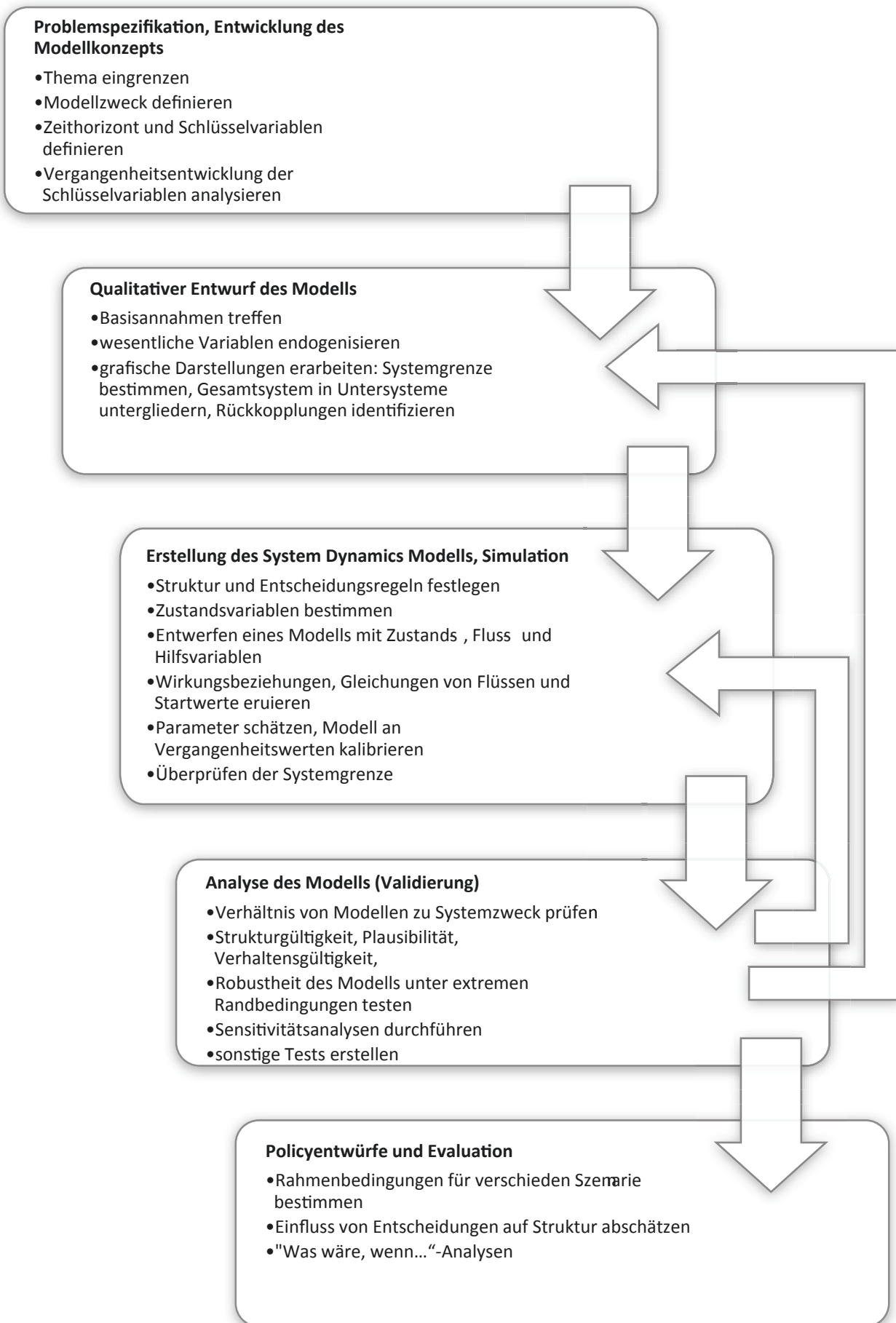


Abbildung 2-1: Schritte und Phasen einer Modellentwicklung
(in Anlehnung an Bossel 1994a und Sterman 2000)

2.2.1 Problemspezifikation

Zu Beginn des Modellierungsprozesses müssen das Thema und der Modellzweck festgelegt und spezifiziert werden [Niemeyer 1977]. Je nach Modellzweck werden der Zeithorizont und die Systemgrenzen sowie die endogenen und exogenen Bereiche aufgeteilt und festgelegt.

Hierbei spielt die Problemformulierung eine entscheidende Rolle. Um ein sinnvolles Modell zu entwickeln, muss ein spezifisches Problem fokussiert werden. Dies erfolgt unter Ausschluss der Elemente, die zwar Teil des großen komplexen Systems sind, aber für die Fragestellung nicht von Relevanz sind [Sterman 2000]. *System Dynamics*-Modelle sollen die Realität vereinfachen, so dass ein Verständnis der Systemzusammenhänge für die Problemstellung entsteht [Forrester 1972]. Variablen, die das Systemverhalten erklären, heißen Schlüsselvariablen und müssen sich endogenisiert innerhalb der Systemgrenzen befinden. Diese Schlüsselvariablen besitzen für das zu entwickelnde System einen hohen Erklärungsgehalt und generieren die Systemdynamik mittels der Wirkungsbeziehungen untereinander [Bossel 1994a]. Sie geben eine Orientierung beim Aufstellen der Systemgrenzen. Während des Modellierungsprozesses werden die Systemgrenzen immer wieder geprüft und können in einem iterativen Prozess verändert werden.

2.2.2 Qualitativer Entwurf des Modells

Bei dem *System Dynamics*-Ansatz liegt der Fokus auf dem Systemverhalten der Strukturen [Schade 2005]. Bei der Systemanalyse liegt daher mehr Gewicht auf der Betrachtung der Beziehungen zwischen den Elementen des Systems als auf der Genauigkeit von Input- und Outputdaten. Der Zusammenhang der einzelnen Elemente wird durch Wirkungsgraphen (engl. *causal loop diagram*, CLD) analysiert und dargestellt [Sterman 2000].

Bei spekulativen Strukturen und vielen weichen Variablen ist eine Quantifizierung nicht sinnig, da eine Genauigkeit lediglich vorgetäuscht wird. In diesen Fällen werden Wirkungsgraphen verwendet. Da zu komplizierte *System Dynamics*-Diagramme nur sehr schwer verständlich sind, muss die Größe bei qualitativen Modellen begrenzt sein [Vennix 1996]. Mithilfe von CLDs können diese Rückkopplungen visualisiert werden. Ihre Aufgabe besteht in der Problemerkklärung und dem Aufzeigen von Strukturzusammenhängen. Sie zeigen, wie sich das System verhalten würde, wenn sich die einflussnehmenden Variablen verändern. Die Identifikation, Strukturierung und Untersuchung von in sich geschlossenen Wirkungsketten (engl. *feedback loops*) erfolgt durch folgende zwei Kopplungen [Sterman 2000]:

- Loops mit positiver Polarität (engl. *reinforcing loops*, R, +)
- Loops mit negativer Polarität (engl. *balancing loops*, B, -)

Die Polaritäten drücken aus, was sich durch die eintretenden Veränderungen in dem System ergibt und welche Auswirkungen eintreten. Die Polaritäten werden so bestimmt, dass die *ceteris-paribus* Annahme gilt, d. h. alle anderen Variablen werden konstant gehalten.

Negative Rückkopplungsschleifen sind zielsuchend und wirken tendenziell jeder Änderung entgegen, so dass sie zu einem konstanten Systemzustand führen [Milling 1974]. Abbildung 2-2 zeigt eine beispielhafte Causal loop-Struktur eines direkten Nachfrage- und Preisentwicklungsprozesses. Die Entwicklungen des Preises (engl. *price*) und der Nachfrage (engl. *consumption*) haben Einfluss auf die gewünschten Produktionskapazitäten (engl. *desired production capacity*). Diese wirken mit einer

Verzögerung (kenntlich gemacht durch die parallelen Striche an dem Pfeil) verstärkend auf die Produktion (engl. *production*) und somit auf den Bestand der Distribution (engl. *Distributor Inventory*). Dieser Bestand nimmt Einfluss auf den Preis, der gleichzeitig die Nachfrage nach dem Produkt wie auf die Lagerbestände beeinflusst. Angebot, dargestellt durch die Produktion, und Nachfrage gleichen sich somit durch die Rückkopplungen einem Preisgleichgewicht an. Eine negative Rückkopplung ist grafisch erkennbar an der Folge der Wirkkreise, die wieder auf das Element Einfluss nehmen und die Anzahl negativer Wirkkreise [Bossel 2004; Sterman 2000].

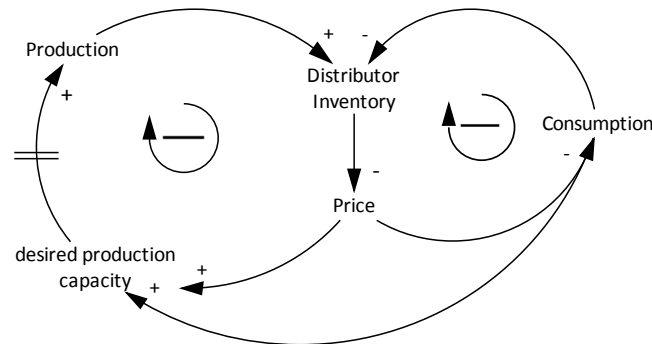


Abbildung 2-2: Causal loop-Struktur des Einflusses der Nachfrage auf die Produktion und somit auf die Preisentwicklung [Berends und Romme 2001]

Positive Rückkopplungen deuten auf einen Prozess des Wachsens oder Sinkens hin, so dass das System zur Explosion oder zum Niedergang neigt [Milling 1974]. Als beispielhaft für eine positive Rückkopplung gilt das exponentielle Wachstum von Bakterien durch Zellteilung (Abbildung 2-3) [Forrester 1972]. Durch die Vermehrung infolge der Zellteilung steigt die Wachstumsrate kontinuierlich an.

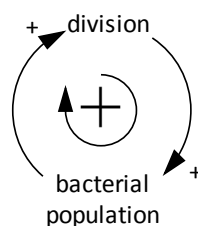


Abbildung 2-3: Positiver feedback loop, der zu exponentiellem Bakterienwachstum führt

In größeren Systemen findet häufig eine Reihe von Kombinationsrückkopplungen statt, so dass das Systemverhalten komplexer und vielschichtiger wird. Dennoch sollte als Ziel bei der Modellentwicklung stets die Einfachheit und Transparenz im Vordergrund stehen, da sonst das Systemverständnis in den Hintergrund tritt und die *System Dynamics*-Methodik falsch interpretiert wird [Meadows 1980].

Nach der Problemartikulation und der Festsetzung der Systemgrenzen sollen Hypothesen formuliert werden, die durch das Modell überprüft werden [Sterman 2000]. Wichtig ist hierbei, dass die Hypothesen die Dynamik als endogene Konsequenz der Wirkungszusammenhänge erklären. Die

Hypothesen gelten als vorläufig, da sie während des Modellierungsprozesses mit der realen Welt verglichen und immer wieder angepasst oder verändert werden. Die Hypothesen bilden somit eine Arbeitstheorie, auf welcher das Problem basiert.

Generell gilt, die Systemgrenzen eher groß zu wählen [Stermann 2000]. Somit können wichtige Rückkopplungen berücksichtigt werden. Bei einer zu detaillierten Betrachtung einzelner Komponenten kann die Dynamik, die innerhalb des Systems greift, nicht korrekt abgebildet werden. Eine Folge können Missinterpretationen sein.

2.2.3 Quantitativer Entwurf des Modells

Ein quantitatives *System Dynamics*-Modell wird durch mathematische Gleichungen dargestellt. Diese multivariablen Gleichungen sind durch Algebra oder Differential- und Integralrechnung lösbar und werden mit Hilfe von spezieller EDV-Software wie z. B. Vensim® berechnet [Berens und Delfmann 2002]. Die Simulation wird anhand mehrerer Gleichungen, welche ein komplettes System widerspiegeln, durchgeführt. Für jede Wirkungsbeziehung muss ein verrechenbarer funktionaler Zusammenhang definiert werden [Bossel 1994b]. Der Schlüssel zur quantitativen Simulation ist, dass die Gleichungen den Realfall widerspiegeln [Coyle 1996]. Mithilfe von Lager-Flussdiagrammen (engl. *stock-and-flow diagram*, SFD) kann das Modell visualisiert und die zugrunde liegenden physischen Strukturen aufgezeigt werden [Stermann 2000]. Die Wirkungsstrukturen der identifizierten Elemente müssen exakt definiert und dimensioniert werden, so dass eine dimensionale Analyse durchgeführt werden kann. Die Parameter der Wirkungsbeziehungen werden mithilfe der Realität, wenn möglich, quantifiziert [Bossel 1994b].

Nach dem Erstellen von Wirkungsgraphen findet die eigentliche Modellentwicklung statt (Abbildung 2-4). Dabei kommen folgende *System Dynamics*-Elemente zum Einsatz, die der Thermodynamik entlehnt sind [Niemeyer 1977]:

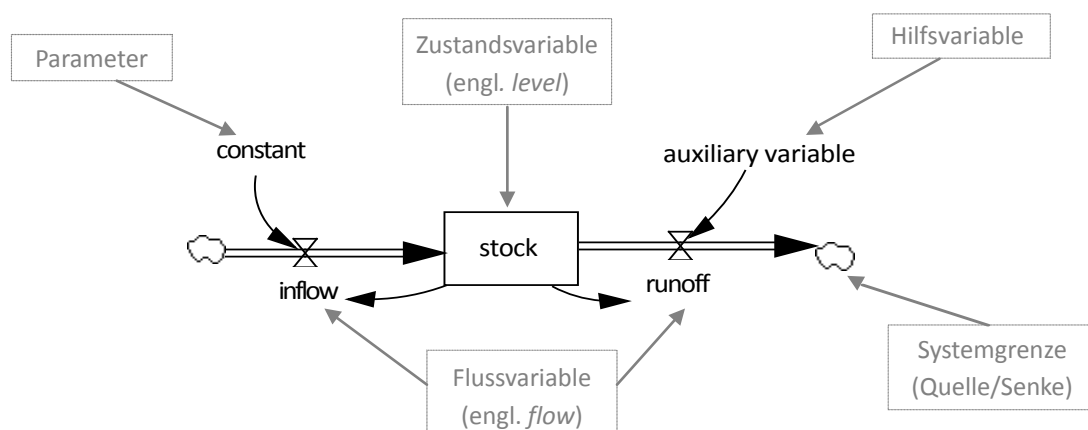


Abbildung 2-4: Beispielanwendung eines SFDs mit modellspezifischen Elementen

Zu den wichtigsten *System Dynamics*-Elementen gehören die Zustandsvariable (engl. *stock*, *level*; Bestandsvariable) zur Darstellung des Systemstatus und die Flussvariable (engl. *flow*, *rate*) zur Darstellung der Veränderung des Systemstatus. Daneben gibt es Hilfsvariablen (engl. *auxiliaries*), Konstanten (engl. *constants*, *parameters*), Wirkungspfeile und die Systemgrenze (engl. *boundaries*)

[Stermann 2000]. Die Hilfsvariablen sind in Funktionen von Systemzuständen eingebettet und lassen Rückschlüsse auf Zusammenhänge innerhalb des Systems zu.

Obwohl den einzelnen Variablen numerische Werte zugeordnet sind, wird betont, dass diese Methode nicht auf exakte Prognosen oder Ergebnisse abzielt [Stermann 2000]. Sie konzentriert sich vielmehr auf die Veränderungen im zeitlichen Kontext. Der eigentliche Schwerpunkt liegt auf dem Prozess der Modellierung, als Mittel zur Verbesserung des Systemverständnisses und der Auffassung des Systems im Ganzen. Auf zukünftige Probleme kann so eine verbesserte Reaktion folgen [Wolstenholme 1990]. Die Entscheidungsregeln (engl. *policy*) sind Richtmaße bzw. Regeln, die bei der täglichen Entscheidungsfindung greifen und so Aussagen über Verhältnisse zwischen Informationseingabe und dem daraus resultierendem Entscheidungsstrom ermöglichen [Forrester 1962]. Für zukunftsbezogene Untersuchungen werden Annahmen über vermutliche Einwirkungen gemacht und in Szenarien (engl. *scenarios, runs*) zusammengefasst [Bossel 1994b]. Mit einigen elementaren Szenarien sollte möglichst das gesamte zukünftig denkbare Wirkungsspektrum abgedeckt und aufgezeigt werden, um einen Gesamtüberblick über das Systemverhalten zu bekommen.

2.2.3.1 Mathematische Formulierung und Rechenverfahren

Generell gilt, dass beide Seiten einer Gleichung gleiche Dimensionen haben müssen. Liegen unterschiedliche Maßeinheiten vor, kann dies ein Zeichen für nicht korrekt formulierte Gleichungen sein [Forrester 1972]. Alle verwendeten Variablen werden als Fließzahlen (engl. *single precision; float*) berechnet.

Bei der dynamischen Modellierung findet eine Veränderung des Zustandes im System im Laufe der Zeit statt, die abgebildet werden soll [Desch und Probst 2006]. Neben den zeitabhängigen Variablen sind auch konstante, von der Zeit unabhängige Parameter (Hilfsvariablen) implementiert.

Systemzustände und Flüsse

Systemzustände ändern sich kontinuierlich im Zeitverlauf in Abhängigkeit von anderen Größen [Forrester 1972; Milling 1974]. Sie sind die Akkumulationen aller vorangegangener Systemveränderungen. Mathematisch handelt es sich um Integrationen. Sie beschreiben die Bedingungen des Systems zu jedem Zeitpunkt. Dieses Ruhelagekriterium dient der Bestimmung von Zuständen, so dass bei einem Anhalten des Systems die abzählbaren, berechneten Elemente bestimmt werden können. Flüsse lassen sich als Zu- und Abflüsse definieren, die entweder zu einer Erhöhung oder aber Absenkung des Systemzustands führen. Sie verändern somit den Wert der Zustandsgrößen pro Zeiteinheit und werden durch die Integranden ausgedrückt. Zustände werden mathematisch durch Differentialgleichungen beschrieben [Forrester 1972; Schade 2005].

$$Z(t + dt) = Z(t) + \int_{x=t}^{t+dt} (Zuflussrate(x) - (Abflussrate(x)) * dx \quad (2-1)$$

mit Z: Zustandswert
t: Zeit

Der Zustand Z zum Zeitpunkt t+dt berechnet sich aus dem Wert der Vorperiode Z(t) zuzüglich des Integrals der Zufluss- und Abflussrate. Da es bei der Berechnung mittels Computer problematisch sein

kann, dass nicht von jeder Funktion ein Integral existiert, werden die Zustandsgleichungen schrittweise in Form von Differenzengleichungen erster Ordnung eingegeben:

$$Z(t + dt) = Z(t) + (Zuflussrate(t) + Abflussrate(t)) * dt \quad (2-2)$$

Der Zustand Z wird durch Addition der Zuflüsse und Subtraktion der Abflüsse berechnet ((2-1) und (2-2)). Zu- und Abflüsse werden mit dem Zeitintervall dt multipliziert. Zustände können nur von Flüssen, nicht aber von anderen Elementen beeinflusst werden.

In Vensim® werden Zustandsänderungen mit der INTEG()-Funktion angegeben:

$$Zustand = INTEG (Zufluss - Abfluss, Anfangszustand) \quad (2-3)$$

Die INTEG()-Funktion ist äquivalent zur Formel (2-1) und repräsentiert das Konzept, dass die Zustandsvariable die Zu- minus die Abflüsse akkumuliert, beginnend beim Anfangszustand. Allen Zustandsgleichungen müssen zum Start der Computersimulation Anfangswerte (engl. *initials*) zugeordnet werden, da sie die Systembedingungen darstellen.

Diese mathematische Vorstellung kann mithilfe eines Beispiels verdeutlicht werden [Desch und Probst 2006]: Bei Betrachtung eines Wasserkessels interessiert die darin enthaltene Wassermenge (Volumen), die durch Zu- und Abflüsse verändert wird. Wenn anstelle der unbekannten Volumenfunktion ein kurzes Zeitintervall betrachtet wird, kann deren Tangente zur Abschätzung des Wachstums benutzt werden. Somit beschreibt die Steigung an der Tangente der Volumenkurve die Wachstumsrate des Volumens. Durch Differenzieren der Volumenfunktion nach der Zeit kann die Steigung ermittelt werden. Die Volumenänderung im Zeitraum wird durch die Differenz von Zu- und Abflüssen beschrieben.

Dynamische Funktionen

Im Vergleich zu den Standardfunktionen hängen dynamische Funktionen nicht allein vom aktuell berechneten Wert ab, sondern berücksichtigen auch vorherige Werte [Wiedemann 2009]. Es wird beispielsweise zwischen Verzögerungs- oder Glättungsfunktionen unterschieden. Bei Verzögerungsfunktionen (engl. *DELAY*) wird die Ausgabe der Input-Größe um die Verzögerungszeit (engl. *delay time*) verzögert. Wichtig ist hierbei, dass die Verzögerungszeit mit dem Zeit- bzw. Rechenschritt (engl. *TIME STEP*, dt) übereinstimmen muss. Die Glättungsfunktion (engl. *SMOOTH*) erreicht durch gleitende, abschnittsweise Integration eine Mittelwertbildung über ein gegebenes Zeitintervall.

Hilfsvariablen, Konstanten, Systemgrenze

Hilfsvariablen werden pro Rechenschritt ohne Berücksichtigung des Wertes der Vorperiode berechnet [Schade 2005]. Bei Hilfsvariablen handelt es sich meist um Gleichungen, die in Abhängigkeit anderer Systemelemente bestimmt werden. Konstanten können sowohl Parameter wie auch exogene Größen des Systems sein, die sich während der Simulation nicht ändern, sie besitzen kein Zeitpostskript. Die Systemgrenze stellt den Übergang vom endogenen zum exogenen Bereich dar.

Die Gleichungen der anderen Variablen haben die Form:

$$F(t) = f(Z, F, H, c, t) \quad (2-4)$$

$$H(t) = g(Z, F, H, c, t) \quad (2-5)$$

mit Z : Zustandswert
 t : Zeit
 F : Fluss (Zufluss oder Abfluss)
 H : Hilfsvariable
 c : Konstante
 f, g : Funktionen

Die Gleichungen können in Abhängigkeit von den Modellierungstools mit einer großen Palette an nicht-linearen Funktionen verknüpft werden. Besonders die Delay-Funktionen (Verzögerung) spielen hierbei eine besondere Rolle, da dadurch zeitverzögerte Variablen Berücksichtigung finden können.

Rechenverfahren

Bei einer Simulation wird je Rechenschritt ein komplettes Modell durchgerechnet. Um die Integralgleichungen zu lösen, wird eine numerische Integration verwendet. Als iterative Rechenmethode wird bei Gleichung (2-2) die Euler-Cauchy-Integration verwendet [Giupponi k.A.]:

$$x(t) = x(t - dt) + f(t, x(t), a) * dt \quad (2-6)$$

mit a : Vektor mit Parametern

Ein Vorteil dieser Integrations-Methodik ist die Schnelligkeit. Sie findet daher bei großen, viele Variablen umfassenden Modellen Anwendung [Schade 2005]. Hierbei wird der neue Zustand aus dem vorhergehenden Zustand und der mit dem folgenden Zustand ermittelten Zustandsveränderungsraten berechnet [Bossel 1994b].

Bei Fragestellungen, bei denen es auf Genauigkeit ankommt, wird das Runge-Kutta-Verfahren verwendet [Bossel 1994b; Schade 2005]. Pro Rechenschritt wird die Zustandsfunktion mehrfach berechnet, sodass der Fehlerterm minimiert wird.

Bei der Wahl der Länge des Zeitintervalls sollte dieser möglichst gering gehalten werden, da dadurch die Genauigkeit des Modells erhöht wird [Bossel 2004; Giupponi k.A.]. Beim Modell SysCu erfolgt eine Rechenschrittweite von 0,25.

2.2.3.2 Software Vensim®

Das Softwareprogramm *Ventana Simulation Environment*, kurz Vensim®, ermöglicht es, intuitiv die Modellstrukturen zu erfassen und wurde in dieser Arbeit als Implementierungsprogramm verwendet. Das Simulationsprogramm lässt sich aufgrund seiner grafischen Benutzeroberfläche relativ einfach bedienen, während im Hintergrund Differentialgleichungen aufgestellt und numerisch gelöst werden [Ford 1999]. Durch die Darstellung komplizierter mathematischer Gleichungen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen können im dynamischen Zeitablauf übersichtliche Ablaufdiagramme erstellt werden. Vensim® ist eine benutzerfreundliche Weiterentwicklung der Programmiersprache DYNAMO, die von Forrester zur rechnerunterstützten Abbildung komplexer

dynamischer Systeme entwickelt wurde [Forrester 1962]. Die Simulationssprache Vensim® ist spezialisiert auf die Simulation dynamischer Prozesse [Desch und Probst 2006]. Auch die Fehlersuche und das Erstellen von Wirkungsgraphen sind mit Vensim® möglich. Nachdem das Modell vollständig und mathematisch korrekt aufgebaut wird, können damit Simulationsdurchläufe durchgeführt werden. Das Programm ist flexibel genug verschiedenste Systeme zu simulieren. Aufgrund seiner Leistungsfähigkeit fiel die Wahl auf Vensim® Professional für Windows Version 6.0 von Ventanta Systems, Inc. Durch Zusatztools wie Optimierungsverfahren, Sensitivitätsanalysen und Verfahren zur Lösung von simultanen Gleichungssystemen lässt sich der Modellaufbau erleichtern und besser validieren.

Rechenschritte von Vensim®

Vensim® arbeitet die Ausdrücke in folgender Reihenfolge, aus Abbildung 2-4 ersichtlich, ab [Wiedemann 2009]. Zu Beginn werden externe Daten geladen, Konstanten gesetzt und die Startzeit (engl. *INITIAL TIME*) berechnet. Im nächsten Schritt werden alle Levelvariablen mit einem Startwert initialisiert. Die folgenden Schritte wiederholen sich pro Schrittweite so lange, bis die Endzeit (engl. *FINAL TIME*) erreicht ist. Jede Hilfsvariable wird durch rekursive Vorgehensweise berechnet. Danach erfolgt die Berechnung der Flüsse. Jede Levelvariable wird mit der zuvor festgesetzten Schrittweite integriert. Danach wird die Zeit (engl. *TIME*) um eine Schrittweite erhöht. Es folgt eine Wiederholung der Berechnung bis zu Endpunkt der Modellierung.

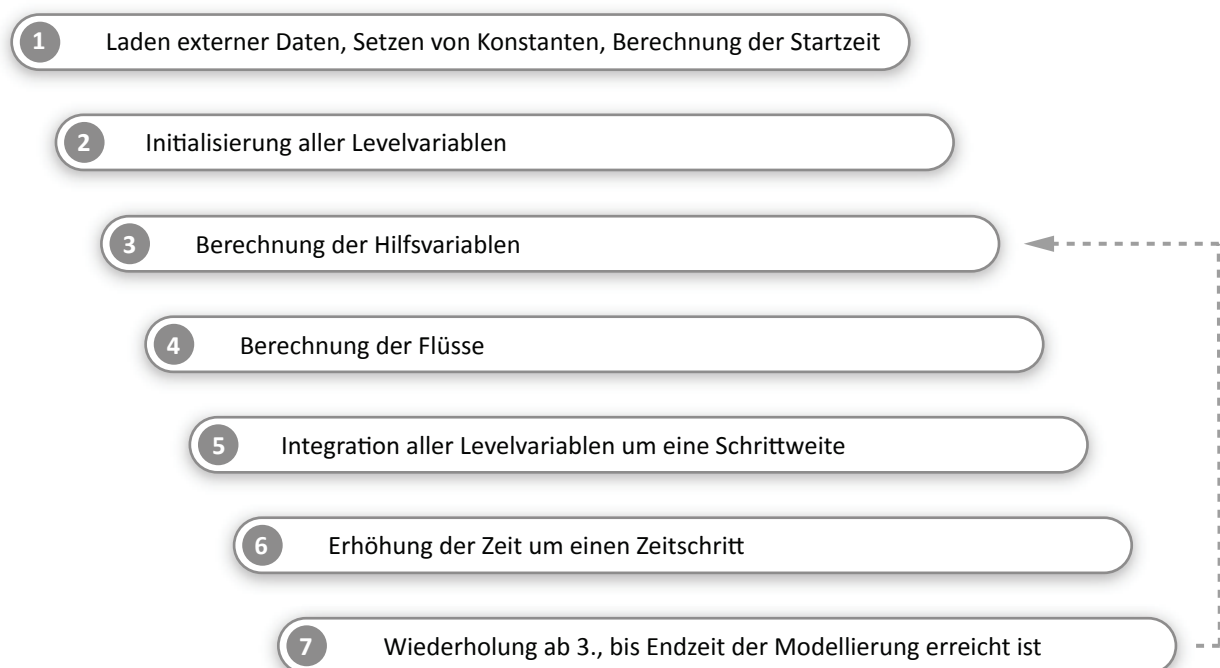


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung der Reihenfolge der Modellberechnung mit Vensim® in Anlehnung an Wiedemann (2009)

2.2.4 Analyse des Modells (Validierung)

Eigenschaften und Güte des Modellansatzes

Bei strukturtreuen Modellen soll nicht jede Wirkungsverknüpfung der Realität detailliert abgebildet werden [Bossel 2004]. Vielmehr geht es darum, der Forderung nach Verhaltensgültigkeit nachzukommen, so dass lediglich die essentiellen verhaltensbestimmenden Wirkungsstrukturen verwendet werden. Daher werden meist nur durch eine kleine Menge an Systemelementen die Struktur und deren Verknüpfungen abgebildet.

Um die Güte eines Modells zu prüfen, muss ein Vergleich mit der Realität erfolgen [Matthies 2002]. Forrester gibt folgendes Prinzip für die Modellgültigkeit:

"Die Modellgültigkeit ist relativer Natur. Die Brauchbarkeit eines mathematischen Simulationsmodells sollte immer im Vergleich mit der gedanklichen Vorstellung oder mit einem anderen abstrakten Modell, das als Ersatz dienen könnte, beurteilt werden."
[Forrester 1972]

Bei der Validierung wird mithilfe von Tests und Analysen die Güte eines Modells in Bezug auf die Realität überprüft [Forrester 1962]. Dabei werden neben der Modellstruktur die Modellparameter, das Modellverhalten und die Anwendungsgültigkeit betrachtet [Bossel 2004; Milling 1974]. Bei quantitativ orientierten Modellen erfolgt die Kalibrierung der Modellparameter durch Vergangenheitsdaten [Schade 2005]. Bei der Betrachtung der einzelnen Modellparameter ist eine Variabilität von meist wenigen Prozenten ausreichend, um Aussagen über das Modellverhalten treffen zu können [Richardson und Pugh 1981]. Ein endgültiger Beweis für die Gültigkeit des Modells ist trotz einer Reihe von Tests nicht möglich. Somit kann auch ein negativer Beweis gegen die Richtigkeit des Modells zu besseren und präziseren Ergebnissen und Entscheidungsfindungen führen als andere Modelle, insbesondere *mentale* Modelle.

Validierung der Modellstruktur

Die Modellstruktur wird anhand der zugrunde liegenden Hypothesen eines Modells bestimmt [Stermann 2000]. Eine Prüfung der Hypothesen auf Gültigkeit und Konsistenz ist hierbei wichtig. Auch muss das Modell bezüglich der Fragestellung hinreichend untersucht und die Wahl der Systemgrenzen muss erörtert werden. Die Zusammensetzung der Modellelemente und deren Verknüpfungen bilden die Struktur und somit die zentralen Verhaltensdeterminanten des Systems. Dabei müssen die in der Struktur getroffenen Zusammenhänge für das betrachtete System relevant sein und ein eindeutiges Verständnis der Struktur gewährleisten [Milling 1974]. Hierbei spielt im Besonderen die dimensionale Konsistenz eine wichtige Rolle, da ohne diesen Test die Aussagefähigkeit des Modells in Frage zu stellen ist [Stermann 2000].

Die Realitätsnähe der gemachten Annahmen und Hypothesen spielt hierbei eine wichtige Rolle. Demnach gilt ein Modell als realistisch, wenn es die bedeutenden Attribute des untersuchten Problems repräsentiert und die reale Situation wiedergibt [Milling 1974; Vennix 1996]. Dabei ist nicht Ziel des Modells die Realität isomorph abzubilden, vielmehr gilt eine Beschränkung auf die verhaltensrelevanten Systemelemente.

Validierung der Parameter

Verhaltensgültige Modelle müssen nicht zwangsläufig empirisch gültig sein [Milling 1974]. Häufig ist dies aufgrund einer mangelnden Datenlage und weicher Faktoren unmöglich. Bei der Validierung der Parameter wird die Modellstruktur mit realistischen Anfangswerten, Konstanten und numerischen Werten der funktionalen Beziehungen aufgebaut. Bei der Analyse komplexer Systeme zeigt sich, dass die Variation statistisch abgesicherter Daten häufig nur einen geringen bis gar keinen signifikanten Einfluss auf das Modellverhalten besitzt [Holt 1965]. Je größer und umfangreicher ein Modell ist, desto höher ist im Allgemeinen der relative Anteil an insensitiven Parametern, so dass zum Teil inkonsistente Datensätze und Statistiken unproblematisch für das Modellverhalten verwendet werden können [Milling 1974].

Parameter, die bei Sensitivitätsanalysen zu besonderem Modellverhalten neigen, müssen möglichst empirisch belegt oder, falls dies nicht möglich ist, anhand von bestmöglichen Schätzwerten behandelt werden [Milling 1974]. Dabei gilt es, den Wertebereich des sensitiven Parameters weit zu fassen, sodass durch die Variation eine Validierung stattfinden kann. Bei großen Modellen ist ein Austesten aller Parameter anhand der enormen Kombinationsmöglichkeiten nicht möglich, so dass eine Beschränkung auf die sensitiven Faktorkombinationen erfolgt. Für die einzelnen Parameter wurden bei SysCu jeweils univariate Sensitivitätsanalysen durch die stochastische Unsicherheit (Monte Carlo) mit 2^{10} Simulationsläufen evaluiert.

Validierung des Modellverhaltens

Bei der Überprüfung der Verhaltensgültigkeit soll gezeigt werden, dass die im Rahmen des Modellzwecks liegenden Anfangsbedingungen und Umwelteinflüsse das reale System aufgrund der Modellstruktur qualitativ gut abbilden [Bossel 2004]. Das Modellverhalten kann mithilfe von Plausibilitäts-, Konsistenz- und Vorhersagetests geprüft werden [Milling 1974; Schade 2005]. Bei Plausibilitätstests wird untersucht, ob das Modell unter verschiedenen Ausgangsparametern sinnvolle Ergebnisse liefert oder ob die Vorzeichen der Änderung richtig sind. Hierbei wird die Robustheit des Modells untersucht [Sterman 2000]. Ob vergangene Verhaltensmuster einigermaßen realistisch abgebildet werden, betrachten Konsistenztests [Schade 2005]. Bei Vorhersagetests liegt der Fokus auf den Modellergebnissen bezüglich der zukünftigen Entwicklung, die durch Muster der Vergangenheit interpretierbar sind. Es wird zwischen zwei verschiedenen Arten von Prognosen unterschieden [Milling 1974]. Bei der Punktvorhersage erfolgt die Prognose des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Verhaltensprognose fokussiert die Vorhersage der Eigenschaften des Systemverhaltens. In der vorliegenden Arbeit findet eine Betrachtung und Prognose des Verhaltens statt. Das Modell SysCu soll eine Funktion als "Intelligenzverstärker" bekleiden, mit dessen Hilfe komplexe Interaktionen und die Systembeziehungen der realen Welt besser verstanden werden können [Milling 1974].

2.2.5 Policyentwürfe und Evaluation

Beim letzten Schritt der Modellentwicklung werden verschiedene Szenarien berechnet [Sterman 2000]. Durch Variation der Rahmenbedingungen können unterschiedliche Szenarien entworfen werden (s. Kapitel 3). Unter dem englischen Begriff *policy* versteht Forrester Entscheidungsregeln, die das System unterschiedlich beeinflussen und Variationen ermöglichen [Forrester 1972].

2.3 SysCu - Implementierung eines *System Dynamics*-Modells für den globalen Kupfermarkt

Bei dem hier entwickelten Modell SysCu handelt es sich um ein *mathematisch-analytisches* Modell, welches nicht-lineare, dynamische Prozesse, die in Wechselbeziehung zueinander stehen implementiert. Dieses *System Dynamics*-Modell basiert auf Computersimulationen unter Verwendung des Softwaretools Vensim®.

Gegenstand der Untersuchung ist die Generierung, Implementierung und die Konsequenzen des Ressourcenkonsums von Kupfer und die Darstellung der daraus resultierenden Angebots- und Nachfrageentwicklungen. Besonderer Fokus wird auf die Sammelquoten und Produktlebensdauern gelegt. Da das System Kupfer viele unterschiedliche Produktionszweige und Produktapplikationen sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene beinhaltet, ist es notwendig, so weit zu abstrahieren, dass lediglich die essentiellen Charakteristika, die Einfluss auf das Weltmarktgeschehen von Kupfer haben, berücksichtigt werden (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Übersicht über die Modelleigenschaften von SysCu

Modelleigenschaften	SysCu
Modelltyp	Dynamische Simulation mit <i>System Dynamics</i> -Methodik
Ansatz	Deskriptiv
Modellansatz	Angebots- und nachfrageseitig, integrativ
Ressourcenverfügbarkeit	Partiell endogen
Bevölkerungswachstum	Exogen
Wirtschaftswachstum	Exogen
Zeithorizont	1960 bis 2100
Periode	Jährlich
Rechenschritt	0,25
Geografischer Bezug	Global (Angebot) 3 Länderkategorien (Nachfrage)

Der gewählte Modellansatz erfolgt deskriptiv und integriert Angebot wie Nachfrage. Der Zeithorizont ist von 1960 bis 2100 in Jahresschritten definiert. Grund für den mehr als 50 Jahre zurückliegenden Modellierungsstartpunkt ist die Modellvalidierung. Bei SysCu wird ein langfristiges Modellverhalten betrachtet, welches jährlich erfolgt. Für die Berechnungen wurde die Schrittweite von 0,25 gewählt, damit die Modellgenauigkeit gegeben ist [Stermann 2000]. Das BIP und die Bevölkerung werden im ersten Schritt nicht global, sondern untergliedert in die drei Entwicklungskategorien (*entwickelt*, *weniger entwickelt* und *kaum entwickelt*) betrachtet. Diese Kategorisierung erfolgt, da zukünftig aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungszustandes einzelner Länder unterschiedliche Anreize auf Angebots- und Nachfrageseite entstehen werden.

Das Modell ist so konzipiert, dass eine Allgemeingültigkeit für metallische Rohstoffsysteme gegeben ist und somit mit relativ geringem Aufwand nachträglich für andere Basismetalle verwendet werden kann.

Bevor die Szenarien und die Ergebnisse sowie das Systemverhalten diskutiert werden, wird auf die zugrunde liegenden Annahmen und Hypothesen eingegangen. Dabei ist zu klären,

- welche relevanten Systemelemente existieren (Kapitel 2.3.1);
- welche Feedback-Loops zwischen den Systemelementen vorhanden sind (Kapitel 2.3.2);
- wie die Modellstruktur aussieht und durch welche Modellfunktionen diese abgebildet werden kann (Kapitel 2.3.3)?

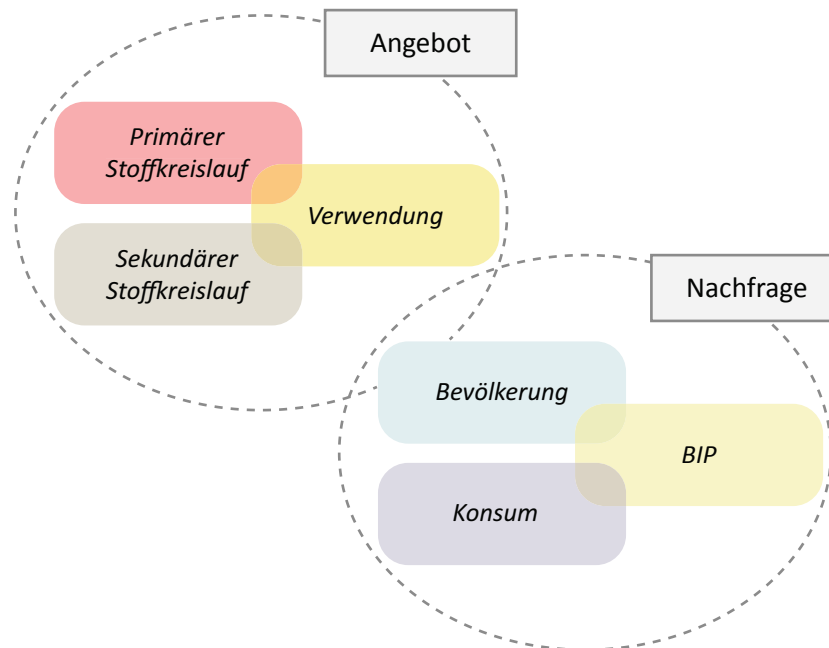


Abbildung 2-6: Allgemeine Übersicht über SysCu

Hinsichtlich eines Modells des globalen Kupfermarktes beschreiben die Modellvariablen und -verknüpfungen das globale Primär- und Sekundärangebot sowie die weltweite Nachfrage (Abbildung 2-6). Das Angebot wird einerseits durch den primären (geogene Rohstofflager) als auch den sekundären (anthropogene Rohstofflager) Stoffkreislauf beschrieben. Die Kupferanwendungen repräsentieren einerseits das Angebot, gleichzeitig aber auch den Konsum und die Nachfrage. Eine Zuordnung ist daher fließend und wird in SysCu durch Rückkopplungen berücksichtigt. Es wird die Annahme getroffen, dass die Branchen, die Kupfer verwenden und anbieten, eher auf der Angebotsseite abgebildet werden sollen. Ein Grund hierfür ist, dass diese Produkte nach Ablauf des Verwendungszeitraumes wieder als eine Rohstoffquelle angesehen werden können und somit das globale Angebot maßgeblich beeinflussen. Da Kupfer weltweit an den Börsen in London, Shanghai, New York (London Metal Exchange, Shanghai Metal Exchange und New York Metal Exchange) gehandelt wird [von Nauckhoff 2010], ist eine globale Betrachtung nötig. Zwar sind die geogenen Kupfererzvorkommen eng regional lokalisiert, die Weiterverarbeitung und Verwendung erfolgt allerdings global.

Die Nachfrageseite wird mithilfe des häufig beschriebenen Zusammenhangs [Binder *et al.* 2008; Campbell 1999; Lucas *et al.* 2007; Graedel und Cao 2010] zwischen Wirtschaftskraft und Kupferkonsum modelliert. Ein wichtiger Aspekt spielt hierbei die Bevölkerungsentwicklung [IIED 2002]. Es wird zwischen *entwickelten, sich entwickelnden* und *wenig entwickelten* Ländern unterschieden.

Die Faktoren Preis und Preisentwicklung sowie Substitution, technischer Wandel spielen bei der Betrachtung von Rohstoffsystemen ebenfalls eine wichtige Rolle [Angerer und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2009; Ashby 2012a; Erdmann *et al.* 2011; ICA 2013; Lucas *et al.* 2007]. Allerdings sind diese Parameter mit großen Unsicherheiten verknüpft und basieren meist auf vagen Annahmen, so dass in der vorliegenden Arbeit auf eine Berücksichtigung im Modell SysCu verzichtet wird.

2.3.1 Systemelemente

Das Ziel von Modellen ist laut Dagum:

"Models should sum up and abstract the permanent and outstanding characteristics of the phenomena under consideration and conceptually systemized, in order to obtain a reasonably complete and consistent body of facts" [Dagum 1968].

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die Systemgrenzen des Modells, welche aufgrund der Möglichkeit des isolierten Testens in zwei Hauptbereiche (engl. *building block approach*) in Angebots- und Nachfrageseite untergliedert sind. Das Modell SysCu beinhaltet neben den endogenen Variablen auch einige exogene Variablen, damit eine Variierung bei der Betrachtung der Szenarien möglich ist. (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Überblick über die endogenen, exogenen und ausgenommenen Variablen als Modellgrenzen des Modells SysCu

Endogene Variablen	Exogene Variablen	Ausgenommene Variablen
Reserve	Verwendungsanteile	Preis
Abbaurrate	BIP-Wachstumsraten	Substitution
Kupfernachfrage	<i>Intensity of Use</i> -Kurve	Technologischer Fortschritt
Kupferprodukte	Produktlebenszyklus	
<i>Stille Reserve</i>	Bevölkerung	
Dissipative Verluste	Sammelquote	
Primärkupferschrott	Ressourcen	
Sekundärkupferschrott		

Ressource, Reserve

Die Betrachtungsweise im Modell SysCu sieht lediglich die *Ressource* als ein festgelegter Lagerbestand (engl. *initial stock*). Die *Reservebasis* und die *Reserve* sind dynamisch zu betrachten [Tilton 1996; Tilton und Lagos 2007].

Zum einen, da durch Exploration neue ökonomisch abbaubare Lagerstätten erkundet werden können, zum anderen können durch neue Technologien und Entwicklungen zuvor unwirtschaftliche Ressourcen abbauwürdig werden [Tilton 1996; Tilton und Lagos 2007]. Auf langfristige Sicht ist die Verfügbarkeit von Primärkupfer einerseits durch kostensteigernde Effekte des Abbaus niedriger

Erzgehalte, andererseits durch kostensenkende Effekte wie technologischen Fortschritt bestimmt [Tilton 2009].

Da der technologische Fortschritt eine zu große Unsicherheit bei der Modellierung darstellt, bleibt dieser direkt unberücksichtigt. Die mögliche Abbaurate (engl. *mining feasibility rate*) gibt einen prozentualen durchschnittlichen Anteil an, wie viel der Kupferressourcen aufgrund der oben genannten Faktoren zur Reservebasis übergehen (Abbildung 2-10).

Kupferanwendungen

In dem Modell SysCu werden sechs Kategorien von Kupferanwendungen in Anlehnung an [Angerer *et al.* 2010] betrachtet:

- *Automobilsektor*
- *Stationäre Elektromotoren*
- *Energie- und Technologieübertragung*
- *Wasserinstallation*
- *Architektur*
- *Sonstiges*

Die hier getroffene Aufschlüsselung ist recht grob, allerdings kann dadurch der Modellzweck besser fokussiert werden. Bei einer zu detaillierten Betrachtung kann der Aspekt der Simplifizierung möglicherweise verloren gehen. Da das entwickelte Modell SysCu unter Umständen auch ohne einen großen Modellierungsaufwand auf andere Basismetalle anwendbar sein soll, wird lediglich zwischen diesen sechs Kategorien unterschieden. Bei Angerer *et al.* handelt es sich um eine deutsche Studie, daher dürften die getroffenen Annahmen auf dem europäischen Markt bzw. den Standards von Industrienationen entsprechen [Angerer *et al.* 2010]. In den *weniger* bzw. *kaum entwickelten* Ländern wird der Wohlstand steigen und sich zukünftig angleichen [Ayres *et al.* 2002; Graedel *et al.* 2002]. Aus diesem Grund basieren die Modellannahmen bzw. Parameterwerte auf der Studie von Angerer *et al.* [Angerer *et al.* 2010].

Lebensdauer

Für das Modell SysCu werden die Daten der mittleren Lebensdauer je nach Kupferanwendung von Angerer *et al.* verwendet (Tabelle 1-3), damit die Betrachtungsebenen konsistent sind und die Produktkategorien beibehalten werden können [Angerer *et al.* 2010].

Zwischen der Primärproduktion und dem Sekundärkupfer liegt eine zeitliche Verzögerung [Arpaci 2000], die bei der Modellierung berücksichtigt werden muss. Bei der Beschreibung und Vorhersage von Produktlebenszyklen kommen verschiedene statistische Modelle der Lebensdauerverteilung zum Einsatz [Derman 1973; Koch und Döge 2001]. Diese sind je nach Branche durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gekennzeichnet. Die Zuverlässigkeits- oder Überlebensfunktion einer Verteilung beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass das Kupferprodukt nach Ablauf einer bestimmten Zeit noch in Gebrauch ist. Da Produkte meist aus mehreren sehr unterschiedlichen Komponenten bestehen, die wiederum unterschiedliche Abnutzungserscheinungen aufweisen, ist es nötig, eine geeignete Verteilung, die dies adäquat abbildet, zu verwenden [Rinne 2009; Weibull 1951]. Hierzu eignet sich die Weibull-Funktion sehr gut [Wilker 2004], die sich aufgrund ihrer Flexibilität für einen breiten Einsatzbereich auszeichnet [Weibull 1951; Wenzel 2007]. Die Weibull-Verteilung wurde 1939 vom

schwedischen Physiker Waloddi Weibull erstmals beschrieben und nach ihm benannt [Derman 1973; Wilker 2004].

Die im SysCu-Modell verwendete Zuverlässigkeits- oder Überlebensfunktion der Weibull-Verteilung lautet [Faes 2012; Weibull 1951]:

$$d_t = e^{-\left(\frac{B_t - b_0}{L}\right)^\beta} \quad (2-7)$$

mit d_t : Weibull-Funktion für die Zuverlässigkeits- oder Überlebensfunktion von Kupfer
 e : eulersche Zahl
 β : Formparameter (Ausfallsteilheit) oder Weibull-Faktor ($\beta=1,8$)
 L : Skalierungsparameter, charakteristische Lebensdauer der Kupferprodukte nach Branche [Jahre]
 B_t : Dauer der Nutzung
 b_0 : Verschiebeparameter, kennzeichnet die ausfallfreie Zeit, vor deren Ablauf keine Ausfälle zu verzeichnen sind (Annahme: ein Fünftel der durchschnittlichen Lebensdauer)

Der Formparameter β ist eine Maßzahl für die Streuung der Ausfallzeit B_t und die Form der Ausfall-dichte [Wilker 2004]. Die charakteristische Lebensdauer L ist der Lageparameter der Verteilung und kann als Mittelwert der Verteilung betrachtet werden. Für β wird der Faktor von 1,8 aus der Literatur angenommen [McCool 2012].

Die Weibull-Verteilung ist für die Modellierung der Lebensdauer geeigneter als eine Normalverteilung, da praktisch alle Produkte aus der Nutzung gehen können [Rinne 2009]. Bei einer Normalverteilung bliebe ein kleiner Anteil der Kupferprodukte im Nutzungspool. Bei der Weibull-Verteilung werden die Stoffströme gemittelt, so dass eine geglättete jährliche Kurve entsteht. Die relative Weibull-Häufigkeit (Abbildung 2-7) erhält man mathematisch aus der Summenhäufigkeit durch eine Differentiation nach der Dauer der Nutzung nach Produktionsjahr t [Derman 1973].

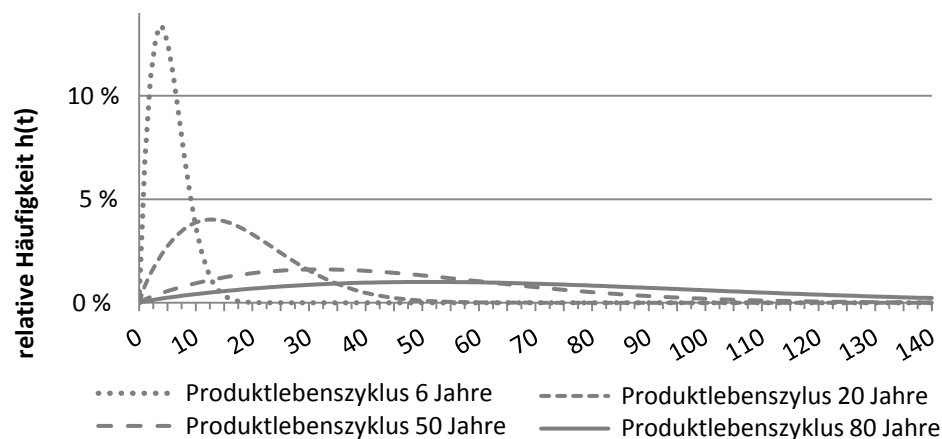


Abbildung 2-7: relative Weibull-Häufigkeitsverteilung der Ausfallquote verschiedener Produktlebenszyklen im zeitlichen Verlauf [Jahre]

Die Formel für die kumulative Häufigkeitsverteilung lautet [McCool 2012]:

$$H(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{L}\right)^\beta} \quad (2-8)$$

mit $H(t)$: kumulierte Weibull-Häufigkeitsverteilung
 t : Dauer der Nutzung nach Produktionsjahr [Jahre]
 $(\equiv B_t - b_0)$

Abbildung 2-8 zeigt die kumulative Häufigkeitsverteilung, bezogen auf ein Produktionsjahr über die Zeit (Formel (2-8)). Je länger der Produktlebenszyklus einer Kupferapplikation ist, desto länger dauert es, bis alle Produkte, die in einem bestimmten Jahr produziert wurden, aus der Nutzung gehen und potenziell rezykliert werden können. Nach rund 18 Jahren sind statistisch betrachtet alle Produkte mit einer Lebensdauer von durchschnittlich 6 Jahren aus der Nutzung genommen. Bei Produkten mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 80 Jahren dauert dies hingegen bis zu 230 Jahre.

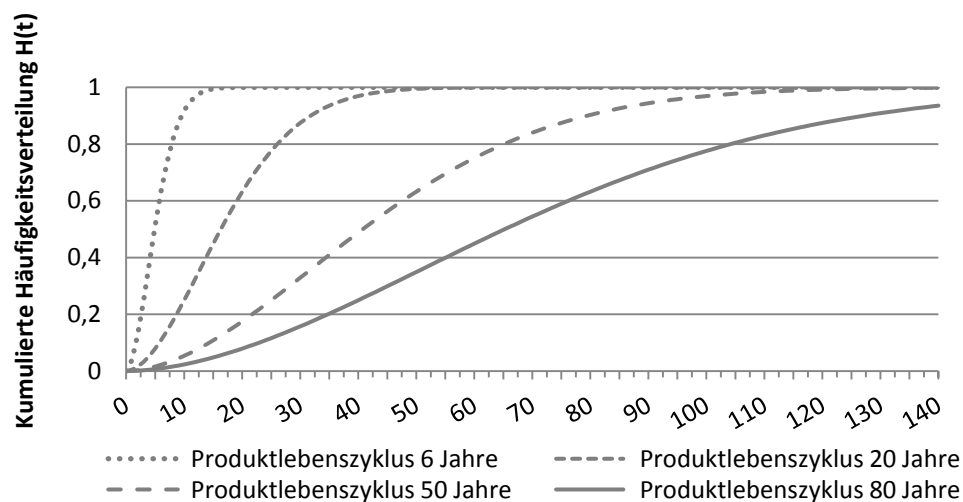


Abbildung 2-8: Kumulierte Weibull-Häufigkeitsverteilung der Ausfallquote unterschiedlicher Produktlebenszyklen im Zeitverlauf [Jahre]

Da im Modell SysCu angenommen wird, dass jedes Jahr neue Kupferprodukte hinzukommen, verändern sich die durchschnittlichen Ausfallquoten. Um dies zu berücksichtigen, wird das arithmetische Mittel der kumulierten Häufigkeiten über die Zeit berechnet und in das Modell implementiert (Kapitel 2.3.3.).

Stille Reserve

Kupfer, welches nicht in den Sekundärkreislauf zurückgeführt wird, lagert als *Stille Reserve* in anthropogenen Minen, beispielsweise in urbanen Agglomerationen. Die Menge an Kupfer, welche nicht rezykliert aus der Nutzung fällt und abgelagert wird, wird von der Sammelquote, der Effizienz- und Rückgewinnungsrate bestimmt. Da die Effizienzrate bei Kupferprodukten aufgrund der chemischen Eigenschaften bereits bei 95 % liegt, findet keine Variierung statt. Die Rückgewinnungsrate wird maßgeblich von der Komplexität des Kupferverbaus in den Produkten bestimmt und ist ebenfalls als relativ konstant anzusehen.

Nachfrage

Bei der Betrachtungsweise der weltweiten Kupfernachfrage gibt es unterschiedliche Ansätze: zum einen wird argumentiert, dass die Kupfernachfrage basierend auf der Weltbevölkerung als Aggregation gesehen werden soll, andere wiederum argumentieren, dass die Nutzung der Kupferprodukte den Konsum bestimmt [Gordon *et al.* 2006; Gordon *et al.* 2007; Tilton und Lagos 2007]. Die vorliegende Arbeit integriert beide Ansätze. Einerseits wird das Angebot durch die Anwendung unterschiedlicher Kupferapplikationen dargestellt, andererseits die Nachfrage anhand des Wirtschaftswachstums und der Bevölkerungsentwicklung.

Wirtschaft und Pro-Kopf-Konsum

Da die Entwicklung des BIPs einen bedeutsamen Einfluss auf das Modellverhalten hat, allerdings außerhalb der Steuerungsmöglichkeit des Kupfersystems liegt [Hogan 1975], wird das Wirtschaftswachstum als exogene Größe modelliert. Eine Variierung der Wirtschaftswachstumsraten ist bei der Betrachtung von Zukunftsszenarien essentiell.

Das Konzept der Nutzungsintensität von Kupfer in Abhängigkeit der Wirtschaftsleistung besticht durch seine Simplität und Effektivität [van Vuuren *et al.* 1999] und wird in SysCu implementiert.

Bevölkerungsentwicklung

Im Modell SysCu wird zwischen den drei Kategorien *kaum entwickelte*, *wenig entwickelte* und *entwickelte* Länder unterschieden. Die Wachstumsraten der Weltbevölkerung unterliegen exogenen Annahmen aus der Studie zur Entwicklung der Bevölkerung der Vereinten Nationen [UN 2012] und werden mittels einer externen Excel-Datei als Datenbank in SysCu implementiert.

Substitution, technologischer Fortschritt, Preisentwicklung

Die Aspekte Substitution, technologischer Fortschritt und Preisentwicklung werden aufgrund ihrer großen Unsicherheiten im Modell SysCu nicht implementiert. Sie beinhalten vielfältige Faktoren [Stermann 2000] und die damit verbundene Komplexität des Systems ist für die Fragestellung in der vorliegenden Arbeit nicht von Relevanz.

2.3.2 Feedback-Loops

Das Modell SysCu implementiert zwei Betrachtungsebenen. Einerseits die Angebotsseite, die die primären und sekundären Stoffkreisläufe von Kupfer fokussiert, und andererseits die Nachfrageseite, welche durch Wirtschaftswachstum und Bevölkerungsentwicklungen beeinflusst wird (Abbildung 2-6).

Mithilfe der Darstellung des CLDs von SysCu werden die bedeutendsten kausalen Determinanten des Systemverhaltens dargestellt und abgebildet. Es geht hierbei nicht um eine eingehende Begründung der darin implizierten Hypothesen, sondern vielmehr um eine Veranschaulichung und Darlegung der komplexen Zusammenhänge des Modells SysCu. Ziel ist eine simplifizierte und Überblick gebende Veranschaulichung der einflussnehmenden Variablen. Das weltweite Kupferangebot wird durch zwei Stoffkreisläufe abgebildet. Der primäre Stoffkreislauf berücksichtigt die geogenen Ressourcen, die Reservebasis und die Minenabbauraten unter der Prämisse der globalen Nachfrage. Der sekundäre

Stoffkreislauf fokussiert die Rückführung bereits benutzten Kupfers unter Berücksichtigung zeitlicher Verzögerungen von teilweise mehreren Jahrzehnten.

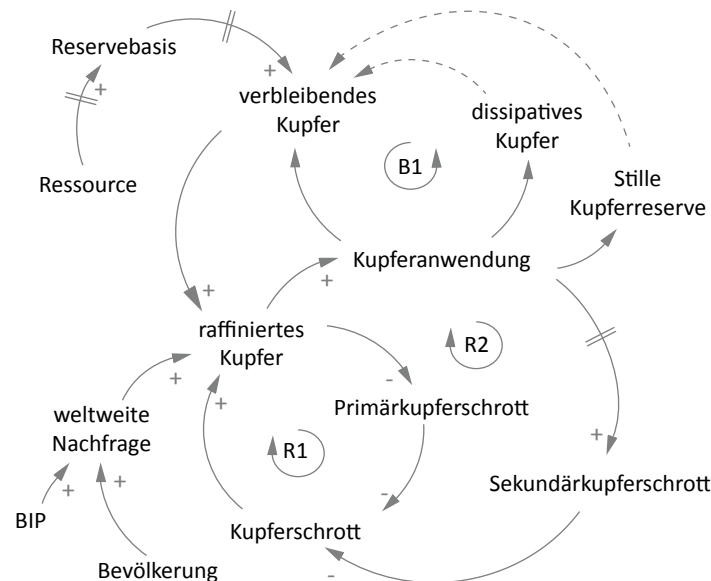


Abbildung 2-9: Causal-Loop-Diagramm des Rohstoffmodells Kupfer SysCu
Verknüpfungen der systemrelevanten Variablen und deren Rückkopplungsschleifen

Der kausale Zusammenhang und Stoffkreislauf von Primärkupferschrott wird durch R1 (engl. *reinforcing loop*) abgebildet (Abbildung 2-9). Ein Teil des raffinierten Kupfers wird durch Stanzabfälle direkt zu Primärkupferschrott. Dieser weist eine sehr hohe Reinheit auf und kann ohne zeitliche Verzögerung direkt dem Sekundärkupferstrom zugeführt werden.

Mit der Schleife R2 wird der Kreislauf des sich in Gebrauch befindlichen Kupfers thematisiert. Das raffinierte Kupfer wird in diversen Produkten verwendet und befindet sich je nach Produktlebensdauer, Wiederverwendungsraten und Anwendungsverteilungen über einen längeren Zeitraum in Gebrauch. Durch Erosion, Abrieb etc. geht ein Teil dieses Kupfers dissipativ in die Umwelt verloren. Ein anderer Teil, der nach dem Ausrangieren durch Nicht-Recycling dem Stoffkreislauf entzogen wird, bildet somit eine *Stille Reserve*. Diese *Stille Reserve* ist ein Lager, welches teilweise weit verbreitet (Lagerung in Haushalten, wilden Müllhalden), teilweise aber auch punktuell lokalisiert (z. B. Deponien) sein kann. Die *Stille Reserve* kann prinzipiell als potenzielles Rohstofflager angesehen werden. Allerdings sind die Lagerstätten ubiquitär verbreitet, mit teilweise nur geringen Kupfermengen, so dass sie kaum dem Stoffkreislauf zugeführt werden. Die Menge an Kupfer, welches dem Recyclingkreislauf zugeführt und stofflich rückgewonnen wird, schließt diese Schleife. Dieser zweite Stoffkreislauf beschreibt das sekundäre Kupferschrottangebot.

Der Regelkreis B1 (engl. *balancing loop*), welcher die verbleibende globale Menge an Kupfer fokussiert, wird als ausbalanciert betrachtet. Die ausrangierten Kupferprodukte werden nach ihrem Gebrauchszyklus entweder deponiert, ein geringer Teil geht dissipativ in die Umwelt verloren, ein anderer Teil wird rezykliert. Die Menge des bereits abgebauten Kupfers stellt einerseits ein potenzielles Lager dar, andererseits minimieren sich aufgrund der steigenden Nachfrage die geogenen Ressourcen. An dieser Stelle ist die weltweite Kupfernachfrage von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der regionalen Spezifizierung von *entwickelten*, *weniger entwickelten* und *kaum*

entwickelten Ländern und der Bevölkerungszahlen wird die Bedeutung für die Gesamtnachfrage unterschiedlich bemessen. Generell verstärkt das Anwachsen der Bevölkerung die globale Nachfrage nach Kupferprodukten. Das Pro-Kopf-BIP wird als Bestandsvariable betrachtet, die im zeitlichen Verlauf aufgrund des Wirtschaftswachstums kontinuierlich anwächst.

Basierend auf der jährlichen Abbaurate von Kupfer entsteht ein Lager an raffiniertem Kupfer. Das Modell simplifiziert die Kupferraffination. Der genaue Erzgehalt des Ausgangsgesteins und die Prozessstufen werden nicht weiter modelliert, da eine detaillierte Betrachtung keinen Mehrwert für die Beantwortung der Fragestellung hat. Die Menge an raffiniertem Kupfer wird durch die noch vorhandene Menge an Kupfer und die globale Nachfrage gesteuert.

2.3.3 Modellstrukturen und -gleichungen

Das Modell SysCu ist in insgesamt neun Teilmodelle (engl. *views*) untergliedert, wobei sechs je nach Produktkategorie spezifisch unterschieden werden. Nachfolgend werden die einzelnen Teilmodelle genauer beschrieben. Die verwendeten Abbildungen sind vereinfachte Darstellungen von SysCu, um einen allgemeinen Überblick zu geben. Im Anhang sind die detaillierten Abbildungen ebenso wie alle zu Grunde liegenden Gleichungen inklusive der Einheiten zu finden.

Für die vorliegende Arbeit wurden fünf Szenarien mithilfe des Modells SysCu berechnet. Der Basislauf, der Literaturwerte implementiert, heißt *Baserun*. Die anderen vier Szenarien *Hohes Wachstum*, *Globale Nachhaltigkeit*, *Pluralismus* und *Balance* berücksichtigen unterschiedliche Modellannahmen, die in Kapitel 3 detailliert beschrieben werden. Bei allen Szenarien wurden die hier beschriebenen Formeln und Annahmen der neun Teilmodelle getroffen. Wenn eine Spezifikation erfolgen musste, wird darauf explizit hingewiesen.

Teilmodell *use with recycling*

Das erste Teilmodell heißt *use with recycling* und behandelt die Primär- und Sekundärproduktion von Kupfer (Abbildung 2-10 und Abbildung Anhang-1). Die produktspezifische Betrachtung erfolgt ausgelagert in den je nach Anwendung benannten Teilmodellen, die während der Simulation automatisch implementiert werden. Da bei der Modellierung von *System Dynamics*-Modellen meist die englische Sprache angewendet wird, erfolgt dies ebenfalls beim Modell SysCu. Die benutzten englischen Begriffe werden zusätzlich im Glossar definiert.

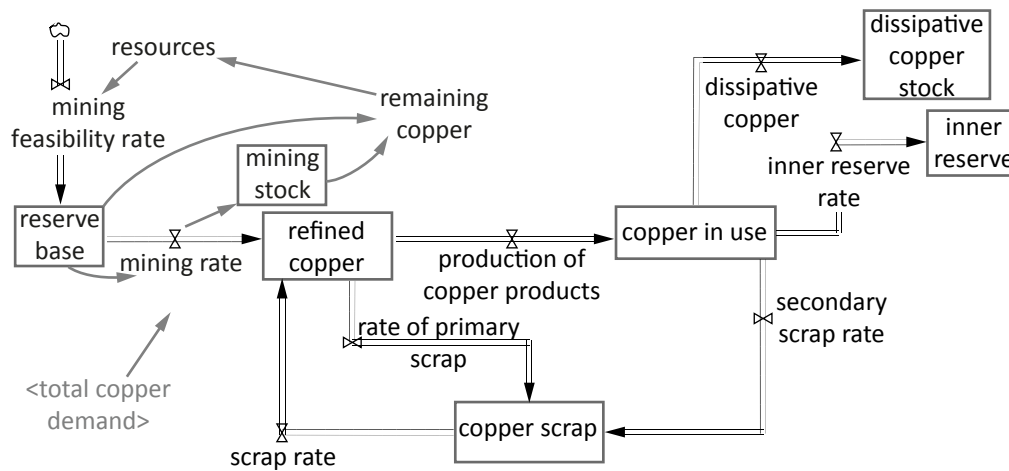


Abbildung 2-10: Simplifizierte Darstellung des globalen Kupferangebotes aus dem Primär- und Sekundärstoffkreislauf basierend auf dem Teilmodell *use with recycling* aus dem Modell SysCu

Als Startpunkt der weltweiten Ressourcen (engl. *initial resources*) wird der Literaturwert von $3,7 \cdot 10^9$ Mg Cu angenommen [USGS 2008; USGS 2012]. Die Ressourcen (engl. *resources*) werden durch die Differenz von geogen vorhandenem und bereits abgebautem Kupfer gebildet.

resources

$$= \text{initial resources} - \text{remaining copper} \quad (2-9)$$

Die mögliche Minenabbaurate (engl. *mining feasibility rate*) beinhaltet eine zeitliche exponentielle Verzögerung erster Ordnung:

mining feasibility rate

(2-10)

$$= \text{DELAY1}(\text{resources} * \text{max mining feasibility rate}, 60)$$

Die maximal mögliche Abbaurate (engl. *max. mining feasibility rate*) drückt aus, wie viel Kupfer jährlich durch neue Explorationen, technologischen Fortschritt und Innovationen der Reservebasis hinzugefügt werden kann. Dieser Wert ist allerdings lediglich eine theoretische Annahme, da nicht kontinuierlich eine Umwandlung von den Ressourcen zu den Reserven stattfindet. Als zeitliche Verzögerung werden 60 Zeitschritte verwendet, was 15 Jahren entspricht. Diese Annahme wird aufgrund der durchschnittlichen Explorationsdauer von etwa 15 Jahren getroffen. Die Reservebasis wird als ein Lagerbestand mit folgender Formel formuliert:

reserve base

$$= \text{INTEG}(\text{mining feasibility rate} - \text{mining rate}, \text{initial reserve base}) \quad (2-11)$$

Als Startwert der Reservebasis (engl. *initial reserve base*) wird die Literaturangabe von $9,4 \cdot 10^8$ Mg Cu verwendet.

Die Abbaurate (engl. *mining rate*) von Kupfer wird durch die globale Nachfrage (engl. *total copper demand*) und die Menge an Sekundärkupfer (engl. *scrap rate*), in Abhängigkeit der noch verbleibenden Reservebasis (engl. *reser*), beschrieben:

$$\begin{aligned} & \text{mining rate} \\ & = \text{IF THEN ELSE}(\text{reserve base} - \text{total copper demand} < 0, \\ & \text{total copper demand} - \text{scrap rate}) \end{aligned} \quad (2-12)$$

Bei den Szenarien *Globale Nachhaltigkeit* und *Balance* wird bei einer möglichen Erschöpfung der geogenen Reserven eine anschließende potenzielle Nutzung von 1 bzw. 2,5 % der *Stillen Reserve* (engl. *inner reserve*) implementiert:

$$\begin{aligned} & \text{mining rate} \\ & = \text{IF THEN ELSE}(\text{reserve base} - \text{total copper demand} < 0, \\ & \text{IF THEN ELSE}(\text{inner reserve} > 0, \text{inner reserve} * 0.01, 0), \\ & \text{total copper demand} - \text{scrap rate}) \end{aligned} \quad (2-13)$$

Das noch verbleibende Primärkupfer (engl. *remaining copper*) berücksichtigt die Reservebasis (engl. *reserve base*) und die kumulierte abgebaute Kupfermenge (engl. *mining stock*):

$$\begin{aligned} & \text{remaining copper} \\ & = \text{IF THEN ELSE}(\text{reserve base} - \text{mining stock} > 0, \\ & \text{reserve base} - \text{mining stock}, 0) \end{aligned} \quad (2-14)$$

Das Lager an raffiniertem Kupfer (engl. *refined copper*) wird durch die Formel berechnet:

$$\begin{aligned} & \text{refined copper} \\ & = \text{INTEG}(\text{mining rate} + \text{scrap rate} - \text{production of copper product} \\ & - \text{rate of primary scrap}, \text{initial refined copper}) \end{aligned} \quad (2-15)$$

Zu den Zuflüssen zählt einerseits das abgebaute primäre Kupfer, andererseits die Menge an zurückgewonnenem und zurückgeführtem Kupferschrott (engl. *scrap rate*). Abflüsse sind die Produktion von Kupferprodukten (engl. *production of copper products*) und die Rate des Primärkupferschrotts (engl. *rate of primary scrap*). Als Startwert raffinierten Kupfers (engl. *initial refined copper*) wird 0 Mg Cu angenommen. Die Primärschrottrate (engl. *rate of primary scrap*) ist das Produkt des prozentualen Anteils an Primärkupfer (engl. *percentage of primary scrap*) und der jährlichen Abbaurate.

Das produzierte Kupfer für Produkte (engl. *production of copper products*) ist die Summe aus dem abgebauten Primärkupfer und dem Sekundärkupfer. Als Startwert für 1960 wird angenommen, dass bereits 7.500.000 Mg Cu verwendet werden. Der Lagerbestand des sich in Gebrauch befindlichen Kupfers wird durch folgende Formel abgebildet:

$$\begin{aligned}
& \text{copper in use} \\
& = \text{INTEG}(\text{production of copper products} - \text{dissipative copper} \\
& \quad - \text{secondary scrap rate} - \text{inner reserve rate}, 7.5e + 006)
\end{aligned}
\tag{2-16}$$

Dieser Parameter wird in den sechs Untermodellen (*car, energy transmission, water installation, architecture, others, electric motors*) je nach Kupferapplikation aufgegriffen und für die Berechnungen verwendet.

Die *Stille Reserve-Rate* (engl. *inner reserve rate*) ist die Summe des nicht zurückgewonnenen Kupfers aus den sechs Anwendungen *Energie- und Technologieübertragung, Automobilsektor, stationäre elektrische Motoren, Architektur, Wasserinstallation* und *Sonstiges*. Die Funktion zur Beschreibung der *Stillen Reserve* lautet:

$$\begin{aligned}
& \text{inner reserve} \\
& = \text{INTEG}(\text{inner reserve rate}, 2.5e + 006)
\end{aligned}
\tag{2-17}$$

Das dissipative Kupfer (engl. *dissipative copper*) ist das Produkt aus der durchschnittlichen dissipativen Kupferrate (engl. *normal dissipative copper rate*) und den produzierten Kupferprodukten. Rund 1 % des sich in Verwendung befindlichen Kupfers gehen dissipativ in die Umwelt verloren.

$$\begin{aligned}
& \text{dissipative copper} \\
& = \text{normal dissipative copper rate} * \text{production of copper products}
\end{aligned}
\tag{2-18}$$

Der Startwert des dissipativen Kupferlagers wird auf 75.000 Mg Cu festgesetzt.

$$\begin{aligned}
& \text{dissipative copper stock} \\
& = \text{INTEG}(\text{dissipative copper}, 75000)
\end{aligned}
\tag{2-19}$$

Die Sekundärkupferrate (engl. *secondary scrap rate*) berücksichtigt die sechs Teilmodelle der Kupferanwendungen, verwendet die dort berechneten Werte und impliziert diese.

$$\begin{aligned}
& \text{secondary scrap rate} \\
& = \text{used copper scrap architecture} + \text{used copper scrap electric motors} \\
& \quad + \text{used copper scrap energy transmission} + \text{used copper scrap others} \\
& \quad + \text{used copper scrap water installation}
\end{aligned}
\tag{2-20}$$

Das Kupferschrottlager (engl. *copper scrap*) ist die Summe der Zuflüsse des primären und sekundären Kupferschrotts minus der Schrottrate (engl. *scrap rate*). Diese wiederum beeinflusst die Abbaurate des Primärkupfers, so dass ein geschlossener Kreislauf entsteht, der durch verschiedene Rückkopplungen mit den Systemvariablen interagiert.

Für die Betrachtung des wiederverwendeten (engl. *used copper scrap car*) und nicht wiederverwendeten Kupfers (engl. *unused copper scrap car*) soll einerseits die spezifische Produktlebensdauer und andererseits die Wiederverwendungsrate (engl. *reuse*) besondere Berücksichtigung finden. Für die Modellierung der Produktlebensdauer wird auf eine kumulierte Weibull-Verteilung (engl. *cum. Weibull lifetime x years*) zurückgegriffen (Kapitel 2.3.1), die das bisher verwendete und im Umlauf befindliche Kupfer abbildet. Hierbei greift das Modell auf eine Excel-Datei zurück, in der für alle Kupferanwendungen und Szenarien die durchschnittlichen Lebensdauern berechnet wurden. Für die Berechnung der Weibull-Häufigkeiten unter Berücksichtigung der Produktionsjahre wird folgende Formel in Excel verwendet:

kumulierte Weibull-Verteilung der durchschnittlichen Produktlebensdauer

$$= \frac{\sum_{t=0}^{FINAL TIME} \left(1 - e^{\left(\frac{t}{L} \right)^{\beta}} \right)}{n} \quad (2-24)$$

mit t : Zeit (engl. TIME), Dauer der Nutzung
 $FINAL TIME$: Endpunkt der Simulation ($FINAL TIME = 2100$)
 L : Skalierungsparameter, charakteristische Lebensdauer der Kupferprodukte nach Branche [Jahre]
 β : Weibull-Faktor ($\beta=1,8$)
 n : Anzahl der Jahre

Zum Einlesen der Daten wird beispielhaft für eine durchschnittliche Produktlebensdauer von 10 Jahren folgender Ausdruck verwendet:

$$\text{cum. Weibull lifetime 10 years} \\ := \text{GET XLS DATA ('Weibull.xls', 'Weibull', '2', 'C13')} \quad (2-25)$$

Der Ausdruck 'Weibull.xls' gibt an, auf welche Datei zugegriffen werden soll. 'Weibull' ist der Name des Tabellenblattes. '2' gibt an, dass die Zeiteinheit in der 2. Zeile beginnt. 'C13' ist der Zellenname, ab dem die Daten ausgelesen werden sollen.

Die Wiederverwendungsrate im *Automobilsektor* (engl. *reuse car*) ist ein Faktor aus der *Sammelquote* (engl. *collection rate*), der *Effizienzrate* (engl. *efficiency rate*) und der *Rückführungsrate* (engl. *recover rate*). Hierbei wird für die Sammelquote ab 2015 eine Differenzierung je nach Szenario vorgenommen.

$$\text{reuse car} \\ = \text{IF THEN ELSE (TIME > 2015,} \\ \text{collection rate after 2015 * efficiency rate * recover rate car,} \\ \text{collection rate * efficiency rate * recover rate car)} \quad (2-26)$$

Die Rate des nicht-rezyklierten Kupfers (engl. *unused copper scrap car*) berechnet sich nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} & \text{unused copper scrap car} \\ & = \text{copper in use car} * (1 - \text{reuse car}) * \text{cum. Weibull lifetime 10 years} \end{aligned} \quad (2-27)$$

Analog dazu die Rate des rezyklierten Kupfers (engl. *used copper scrap car*):

$$\begin{aligned} & \text{used copper scrap car} \\ & = \text{copper in use car} * \text{reuse car} * \text{cum. Weibull lifetime 10 years} \end{aligned} \quad (2-28)$$

Die gesamte *Stille Reserve* des Automobilsektors wird durch

$$\begin{aligned} & \text{total inner reserve car} \\ & = \text{INTEG}(\text{unused copper scrap car}, \text{initial unused copper in scrap car}) \end{aligned} \quad (2-29)$$

beschrieben. Als Startwert für das nicht-rezyklierte Kupfer im *Automobilsektor* (engl. *initial unused copper in scrap car*) wird aufgrund der nicht vorhandenen Datenlage 0 Mg angenommen. Dies erfolgt auch für das rezyklierte Kupfer:

$$\begin{aligned} & \text{copper in scrap car} \\ & = \text{INTEG}(\text{used copper scrap car}, \text{initial copper in scrap car}) \end{aligned} \quad (2-30)$$

Teilmodell *population*

Für die Berechnung des Pro-Kopf-BIPs der Welt (engl. *GDP world per capita*) in dem Teilmodell *demand* wird in dem Modell SysCu auf das Teilmodell *population* zurückgegriffen und für weitere Berechnungen implementiert (Abbildung 2-12). Auf dieses Bevölkerungs-Teilmodell wird im Folgenden eingegangen. Anschließend wird das Teilmodell *demand* erläutert.

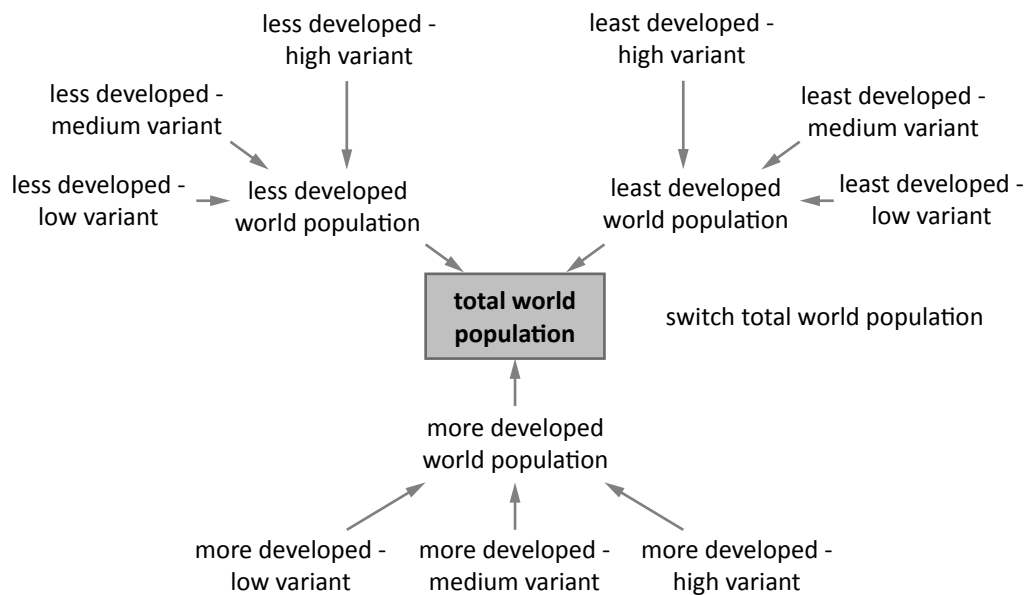


Abbildung 2-12: Implementierung der UN-Bevölkerungsprognosen durch das Teilmodell *population* in das Modell SysCu

Bei dem *population*-Teilmodell werden die Daten der drei UN-Varianten mittels einer externen Excel-Datei in das Modell SysCu eingepflegt [UN 2012]. Exemplarisch wird lediglich auf die Kategorie *entwickelt* (*more developed*) eingegangen. Die Modellierung erfolgt für die beiden anderen Kategorien *less developed* und *least developed* analog. Je nach Szenario wird zwischen drei unterschiedlichen UN-Szenarien bezüglich des Bevölkerungswachstums unterschieden. Die folgende Formel legt das Auslesen der Excel-Datei für eine hohe Wachstumsrate *entwickelter* Länder (engl. *more developed - high variant*) dar:

$$\begin{aligned} & \text{more developed - high variant} \\ & := \text{GET XLS DATA}('population.xls', 'more developed', 'B', 'D5') \end{aligned} \quad (2-31)$$

Die externe Datei, auf die zugegriffen wird, heißt 'population.xls', das zu verwendende Datenblatt 'more developed'. Die Startzeit beginnt in der Spalte 'B'. Die auszulesenden Datenwerte beginnen bei 'D5'.

Die Variable '*entwickelte* Weltbevölkerung' (engl. *more developed world population*) berücksichtigt die Excel-Datenwerte je nach UN-Variante und welches Szenario verwendet werden soll:

$$\begin{aligned} & \text{more developed world population} \\ & = \text{IF THEN ELSE}(\text{switch total world population} = 1, \\ & \quad \text{more developed - high variant}, \\ & \quad \text{IF THEN ELSE}(\text{switch total world population} = 2, \\ & \quad \quad \text{more developed - medium variant}, \text{more developed - low variant})) \end{aligned} \quad (2-32)$$

Das Umschalten der Bevölkerungsvarianten (engl. *switch total world population*) stellt die Auswahl des jeweiligen Szenarios ein.

$$\text{switch total world population} = 2 \quad (2-33)$$

mit 1: hohe Variante (engl. *high variant*)
 2: mittlere Variante (engl. *medium variant*)
 3: geringe Variante (engl. *low variant*)

Die gesamte Weltbevölkerung (engl. *total world population*) wird aus der Summe der drei Kategorien gebildet.

$$\begin{aligned} \text{total world population} \\ = & \text{least developed world population} + \text{less developed world population} \\ & + \text{more developed world population} \end{aligned} \quad (2-34)$$

Teilmodell *demand*

Das Teilmodell *demand* beschäftigt sich mit der Modellierung der globalen Kupfernachfrage, untergliedert in die drei Länderkategorien *entwickelt*, *weniger entwickelt* und *kaum entwickelt* (engl. *more developed*, *less developed*, *least developed*) (Abbildung 2-13).

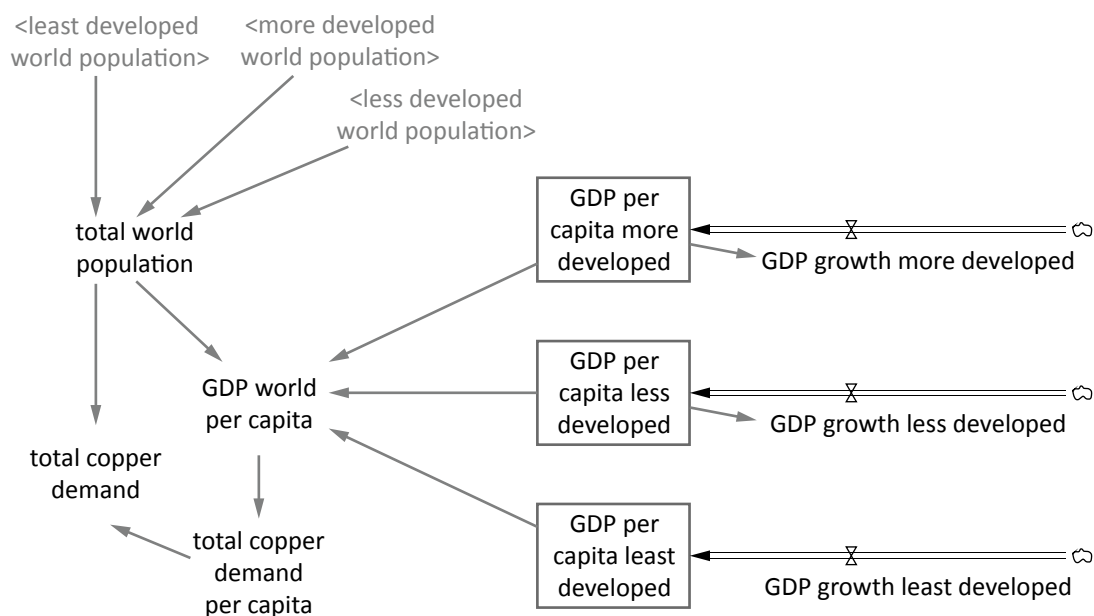


Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der globalen Kupfernachfrage und Wirtschaftswachstum des Teilmodells *demand* des Modells SysCu

Die Modellierung des Pro-Kopf-BIPs (engl. *GDP per capita*) wird exemplarisch für *entwickelte* Länder gezeigt. Die Formeln unterscheiden sich je nach Region von den Werten, die zugrunde liegende Theorie bleibt allerdings bei allen bestehen:

$$\begin{aligned}
 & \text{GDP per capita more developed} \\
 &= \text{INTEG}(\text{GDP growth more developed}, \\
 & \text{initial GDP per capita more developed})
 \end{aligned}
 \tag{2-35}$$

Als Startwert des Pro-Kopf BIPs *entwickelter* Länder (engl. *initial GDP per capita more developed*) wird auf die realen Zahlen von 1960 von der Weltbank (2013) zurückgegriffen. Das BIP-Wachstum *entwickelter* Länder (engl. *GDP growth more developed*) wird durch die BIP-Wachstumsrate (engl. *GDP growth rate more developed*) und das Pro-Kopf-BIP (engl. *GDP per capita more developed*) berechnet:

$$\begin{aligned}
 & \text{GDP growth more developed} \\
 &= \left(\frac{\text{GDP growth rate more developed}}{100} \right) * \text{GDP per capita more developed}
 \end{aligned}
 \tag{2-36}$$

Die BIP-Wachstumsrate *entwickelter* Länder (engl. *GDP growth more developed*) berücksichtigt einerseits die historische Entwicklung von 1960 bis 2011 und ermöglicht gleichzeitig eine zukünftige Variierung ab 2011:

$$\begin{aligned}
 & \text{GDP growth rate more developed} \\
 &= \text{IF THEN ELSE}(\text{TIME} - \text{INITIAL TIME} > 51, \\
 & \text{GDP growth rate after 2011 more developed}, \\
 & \text{GDP growth rate before 2011 more developed})
 \end{aligned}
 \tag{2-37}$$

Das durchschnittliche Pro-Kopf-BIP (engl. *GDP world per capita*) wird nach folgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned}
 & \text{GDP world per capita} \\
 &= (\text{GDP per capita least developed} * \text{least developed world population} \\
 & + \text{GDP per capita less developed} * \text{less developed world population} \\
 & + \text{GDP per capita more developed} * \text{more developed world population}) \\
 & \div \text{total population}
 \end{aligned}
 \tag{2-38}$$

Das komplette Welt-BIP (engl. *GDP world total*) ist die Summe der drei regionalen Entwicklungskategorien und den jeweiligen Bevölkerungszahlen:

$$\begin{aligned}
 & \text{GDP world total} \\
 &= \text{GDP per capita least developed} * \text{least developed world population} \\
 & + \text{GDP per capita less developed} * \text{less developed world population} \\
 & + \text{GDP per capita more developed} * \text{more developed world population}
 \end{aligned}
 \tag{2-39}$$

Zur Implementierung der zugrunde gelegten Metall-Nutzungsintensitätskurve (Kapitel 2.3.1) erfolgt die Berechnung des gesamten Pro-Kopf-Kupfer-Konsums (engl. *total copper demand per capita*) nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} & \text{total copper demand per capita} \\ & = -1^{-11} * \text{value of GDP per capita}^2 + 7.5^{-7} * \text{value of GDP per capita} \end{aligned} \quad (2-40)$$

Dabei ist der Wert des Pro-Kopf-BIPs (engl. *value of GDP per capita*) der zuvor berechnete Wert des globalen Pro-Kopf-BIPs (engl. *GDP world per capita*).

Der globale Kupferkonsum (engl. *total copper demand*) wird zudem mit einem variabel einsetzbaren Unsicherheitsfaktor (engl. *uncertainty factor*) versehen:

$$\begin{aligned} & \text{total copper demand} \\ & = \text{total world population} * \text{total copper demand per capita} * \text{uncertainty factor} \end{aligned} \quad (2-41)$$

"The trend will continue until it ends."

[Forrester 1962]

3 Ergebnisse

3.1 Überblick über die fünf entwickelten Szenarien

Bei der Entwicklung von Szenarien sollen diese in sich plausible und konsistente Entwicklungspfade beinhalten, die zukünftig eintreten können. Ziel ist hierbei, mögliche Entwicklungen zu analysieren und abzubilden. Hierbei werden hypothetische Situationen dargestellt und aufgezeigt. Es wird betrachtet, ob und wie getroffene Annahmen Auswirkungen auf das System haben [Strohhecker 2008]. Das Wirtschaftswachstum, die Bevölkerungsentwicklung, Sammelquoten, Kupferanwendungsanteile sind als exogene Größe modelliert. Es werden fünf Szenarien berechnet und analysiert. Hierbei sollen Unsicherheit zukünftiger Projektionen angemessen berücksichtigt und mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Projektionen betrachtet werden.

Tabelle 3-1 gibt einen Gesamtüberblick über die fünf in dieser Arbeit modellierten Szenarien. Der Basislauf mit den Standardwerten aus der Literatur [Angerer *et al.* 2010] heißt *Baserun* (schwarz) und beinhaltet keine weiteren Variabilitäten. Bei dem Szenario *Hohes Wachstum* (gelb) wird ein starker Anstieg der Weltbevölkerung und damit einhergehend das Wachstum der Wirtschaft und der Nachfrage angenommen. Das Szenario *Globale Nachhaltigkeit* (grün) berücksichtigt eher ein nachhaltiges Wirtschaften mit Verlängerung der Produktlebenszyklen und Erhöhung der Sammelquoten. Es erfolgt eine Nutzung der *Stillen Reserve*. Im Szenario *Pluralismus* (blau) wird ein geringes Bevölkerungswachstum angenommen und die Produktlebensdauer erhöht. Das letzte Szenario heißt *Balance* (orange) und sieht eine relativ gleichmäßige Verteilung der Kupferanwendungen vor. Drei von vier Produkten werden in diesem Szenario eingesammelt und dem Sekundärstoffkreislauf wieder zugeführt. Auch erfolgt eine Nutzung der *Stillen Reserve*.

Tabelle 3-1: Übersicht der variierten Modellparameter der fünf verwendeten Szenarien *Baserun*, *Hohes Wachstum*, *Globale Nachhaltigkeit*, *Pluralismus* und *Balance*

		<i>Baserun</i>	<i>Hohes Wachstum</i>	<i>Globale Nachhaltigkeit</i>	<i>Pluralismus</i>	<i>Balance</i>
Kupfer- anteile ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	12	17	10	15	16
	<i>Elektromotoren</i>	12	19	13	9	16
	<i>Energie- und Technologie- übertragung</i>	26	34	32	18	20
	<i>Wasserinstallation</i>	13	9	9	1	14
	<i>Architektur</i>	2	5	1	5	10
	<i>Sonstiges</i>	35	14	35	38	24
Produkt- lebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	10	8	15	11	13
	<i>Elektromotoren</i>	8	7	11	6	13
	<i>Energie- und Technologie- übertragung</i>	50	45	60	70	55
	<i>Wasserinstallation</i>	80	60	50	90	100
	<i>Architektur</i>	80	60	100	90	100
	<i>Sonstiges</i>	10	9	14	20	8
Sammel- quote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	80	75	90	70	75
	<i>Elektromotoren</i>	70	80	80	60	75
	<i>Energie- und Technologie- übertragung</i>	80	70	90	75	75
	<i>Wasserinstallation</i>	30	10	40	35	75
	<i>Architektur</i>	80	60	85	70	75
	<i>Sonstiges</i>	50	40	60	55	75
Bevölkerung [UN- Variante]	<i>wenig entwickelt</i>					
	<i>sich entwickelnd</i>	mittel	hoch	mittel	niedrig	mittel
	<i>entwickelt</i>					
BIP Wachstums- rate nach 2011 [%]	<i>wenig entwickelt</i>	0,96	2,7	2	1,3	1,88
	<i>sich entwickelnd</i>	2,91	5,5	4	3,5	1,88
	<i>entwickelt</i>	2,42	3,2	1,5	1	1,88
Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> [%]		nein	nein	1	nein	2,5

Abbildung 3-1 bis Abbildung 3-3 geben eine grafische Übersicht über die Variabilität der veränderten Parameter aller Szenarien. Die verwendeten Kupferanteile nach 2015 (engl. *percentages copper after 2015*) (Abbildung 3-1), die Produktlebensdauer (engl. *cum. Weibull lifetime x years*) (Abbildung 3-2) und die Sammelquote der Kupferapplikationen ab 2015 (engl. *collection rate after 2015*) (Abbildung 3-3) werden jeweils variiert. Als Werte für die Verteilungen der Kupferanwendungen vor 2015 werden die Zahlen von Angerer *et al.* verwendet [Angerer *et al.* 2010].

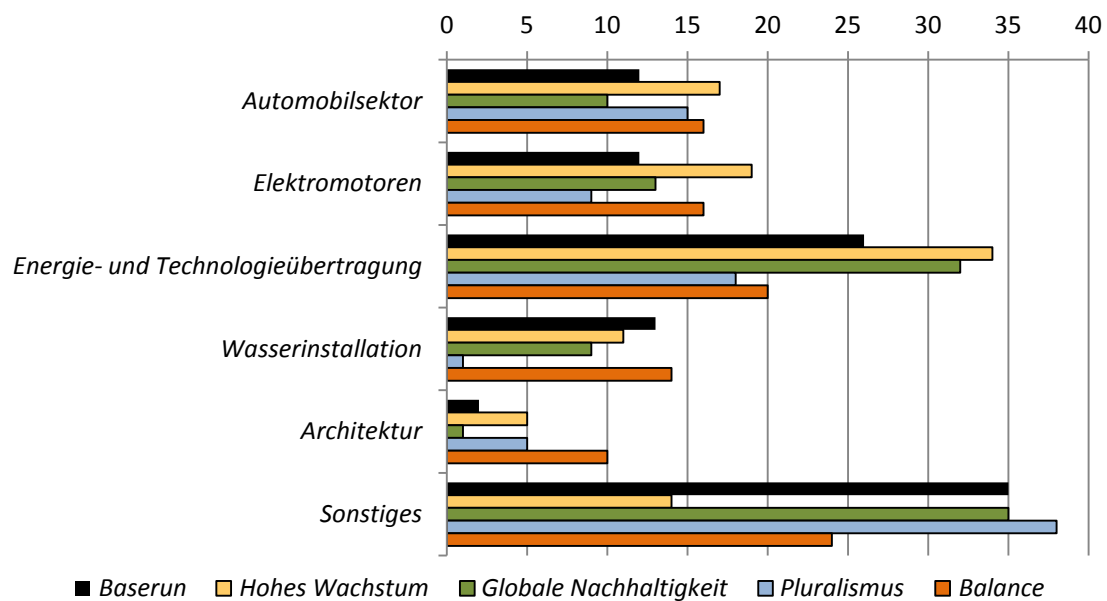


Abbildung 3-1: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien des prozentualen Anteils der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in %] nach 2015

Die im Ausgangsszenario *Baserun* verwendeten Annahmen basieren auf Literaturangaben [Angerer *et al.* 2010] bzw. konstanten Wachstumsraten der vergangenen Jahre seit 1960 [The World Bank 2013b]. Das Szenario *Hohes Wachstum* nimmt aufgrund des starken Bevölkerungswachstums und der stark wachsenden Wirtschaftsleistung eine verkürzte Produktlebensdauer an. Das Szenario *Globale Nachhaltigkeit* fokussiert sich besonders auf eine starke Erhöhung der Sammelquote ab 2015 und Verlängerung der Produktlebenszyklen; Wirtschaftswachstum und die Bevölkerung hingegen wachsen nur moderat an. Hierbei wird bei Erschöpfung der geogenen Reserven eine Verwendung der *Stillen Reserve* von durchschnittlich 1 % angenommen. Beim Szenario *Pluralismus* findet eine Durchmischung der Raten, Lebenszyklen und Kupferanteile statt. Das Bevölkerungswachstum wird als gering angenommen, das wirtschaftliche Wachstum ist in *wenig entwickelten* und *sich entwickelnden* Ländern etwas höher als in der Vergangenheit, in *entwickelten* Ländern wird ein sehr geringes Wachstum von lediglich 1 % angenommen. Beim Szenario *Balance* wird eine Sammelquote von 75 % bei allen Kupferapplikationen ab 2015 angenommen. Auch das Weltwirtschaftswachstum wird bei allen drei regionalen Kategorien auf 1,88 % gemittelt. Die Kupferverwendung nach Applikationen erfolgt ebenfalls ab 2015 relativ ausgeglichen. Die Produktlebenszyklen fallen im Schnitt relativ lang aus. Die *Stille Reserve* können mit einer möglichen Nutzung von 2,5 % das globale Kupferangebot ausweiten.

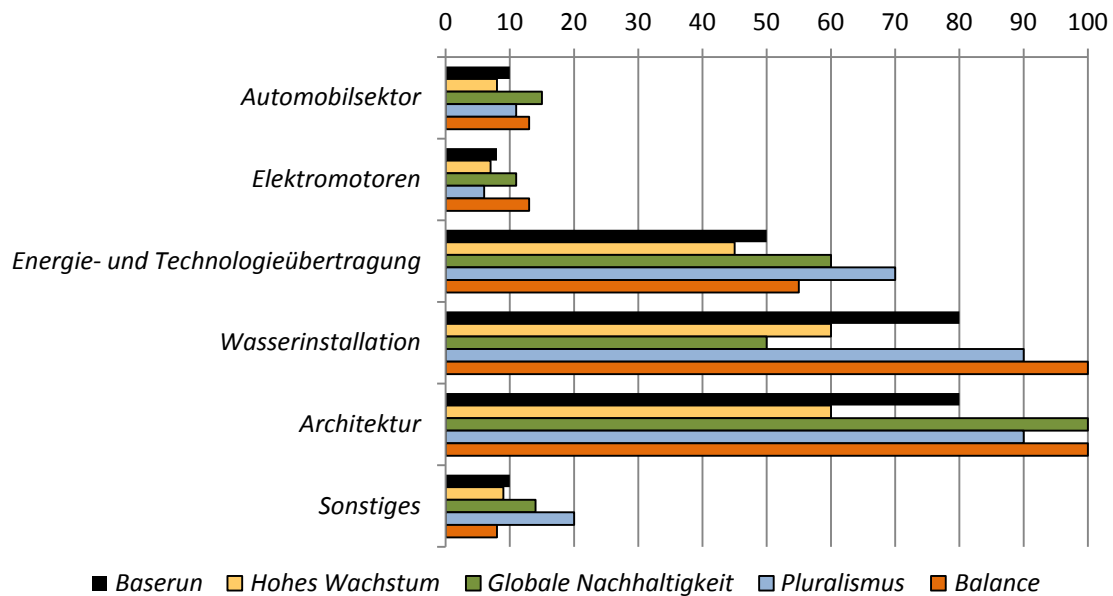


Abbildung 3-2: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien des Produktlebenszyklus der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in Jahren]

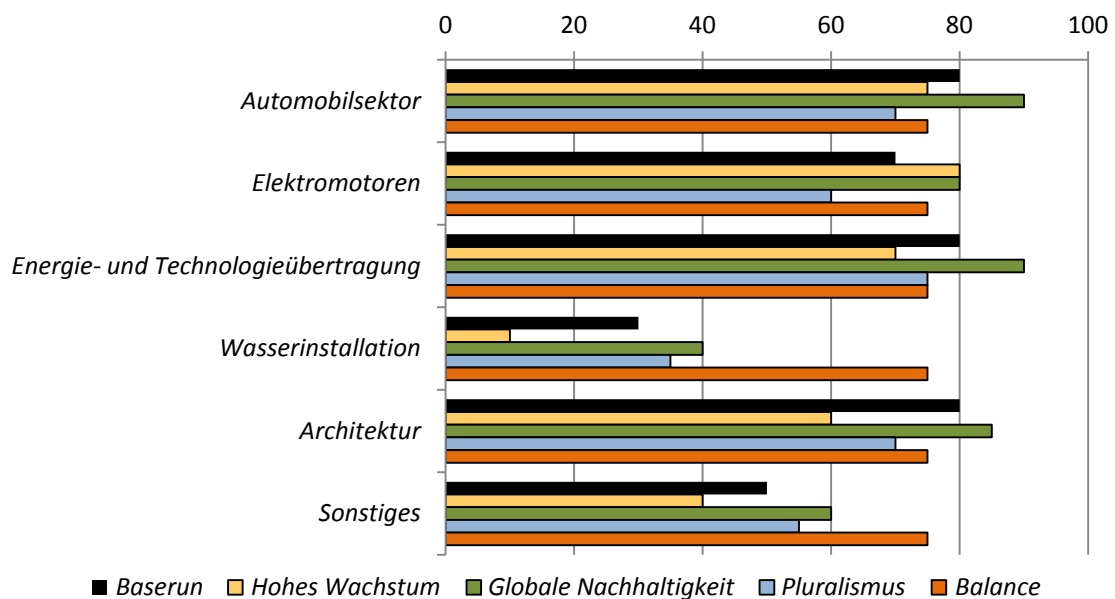


Abbildung 3-3: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien der Sammelquote der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in %] nach 2015

Das daraus resultierende Systemverhalten sowie eine detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden Annahmen wird je Szenario in den folgenden Unterkapiteln betrachtet.

3.2 Szenario *Baserun*

Bei der Variante *Baserun* basieren die verwendeten Werte von Sammelquote, Produktlebenszyklus und Kupferanteil nach 2015 auf Literaturdaten von Angerer *et al.* [Angerer *et al.* 2010]. Die BIP-Wachstumsraten nach 2011 spiegeln das durchschnittliche Wirtschaftswachstum der drei Regionen seit 1960 wider [The World Bank 2013b]. Es wird ein konstantes Wachstum, basierend auf der Vergangenheit bis 2100, angenommen (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario *Baserun*

Produktlebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	10
	<i>Elektromotoren</i>	8
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	50
	<i>Wasserinstallation</i>	80
	<i>Architektur</i>	80
	<i>Sonstiges</i>	10
Sammelquote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	80
	<i>Elektromotoren</i>	70
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	80
	<i>Wasserinstallation</i>	30
	<i>Architektur</i>	80
	<i>Sonstiges</i>	50

Der Anteil der Kupferapplikationen *Sonstiges* wie Haushaltsgeräte, Leiterplatten oder LKW macht nach 2015 in dem *Baserun*-Szenario über ein Drittel aus (Abbildung 3-4). Die durchschnittliche Anwendungsdauer beläuft sich sowohl im *Automobilsektor* als auch bei *Sonstiges* auf 10 Jahre (Tabelle 3-2). Lediglich *Elektromotoren* liegen mit 8 Jahren etwas darunter. Dieses Segment macht wie auch der *Automobilsektor* einen Anteil von jeweils rund 12 % ab 2015 aus, ähnlich wie auch die *Wasserinstallation* mit 13 %. Fast das Doppelte macht die Kupferanwendung *Energie- und Technologieübertragung* mit einer Durchschnittslebensdauer von 50 Jahren aus (26 %). Der Anteil von Kupfer bei Dächern, Regenrinnen etc. macht demnach nur noch rund 2 % der gesamten Kupferverwendung aus. Rund ein Viertel des sich in Gebrauch befindlichen Kupfers wird im Mittel 80 Jahre verwendet.

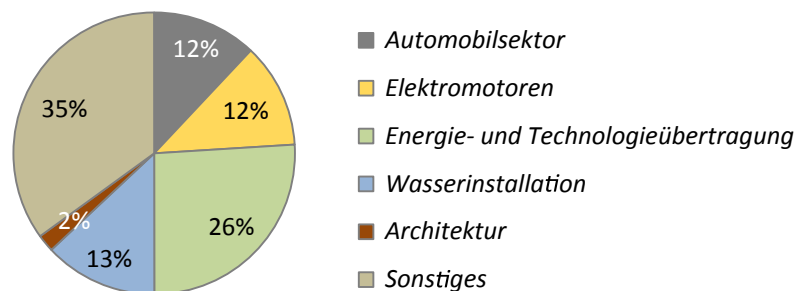


Abbildung 3-4: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 im Szenario *Baserun*

Die Sammelquote von Kupfer aus dem *Automobilsektor*, der *Energie- und Technologieübertragung* und *Gebäuden* beläuft sich im gesamten Modellierungszeitraum auf 80 %, gefolgt von *Elektromotoren* mit 70 % (Abbildung 3-3). Rund die Hälfte der Kupferanwendungen *Sonstiges* wird gesammelt und kann somit potenziell dem Sekundärkreislauf zugeführt werden. Bei dem Bereich *Wasserinstallation* beträgt dies nur 30 %. Ein Grund hierfür ist, dass Rohre und Fittings nur schwer wieder ausgebaut und gesammelt werden können.

Als UN-Variante für das zukünftige Bevölkerungswachstum wird *mittleres* Wachstum angenommen. 2010 lebten 67 % der Weltbevölkerung in *wenig entwickelten* Ländern (Abbildung 3-5). Bis 2050 findet eine Verschiebung hin zu den *kaum entwickelten* Ländern statt. Laut UN-Prognosen können bei mittlerem Wachstum dann 15 % der Menschen in *kaum entwickelten* Ländern leben. Der Anteil der Menschen, die in *entwickelten* Ländern leben, steigt von 14 % auf 16 %. Bis 2100 geht der relative Anteil jedoch auf 12 % der Gesamtbevölkerung zurück. Besonders auffällig ist, dass in diesem Szenario 3 von 10 Menschen 2100 aus *kaum entwickelten* Ländern kommen. Insgesamt wächst die Weltbevölkerung bei dieser Variante auf knapp 10,9 Milliarden Menschen (Tabelle Anhang-1). Dies würde einem relativen Zuwachs bis 2100 von etwa 57 % gegenüber 2010 entsprechen.

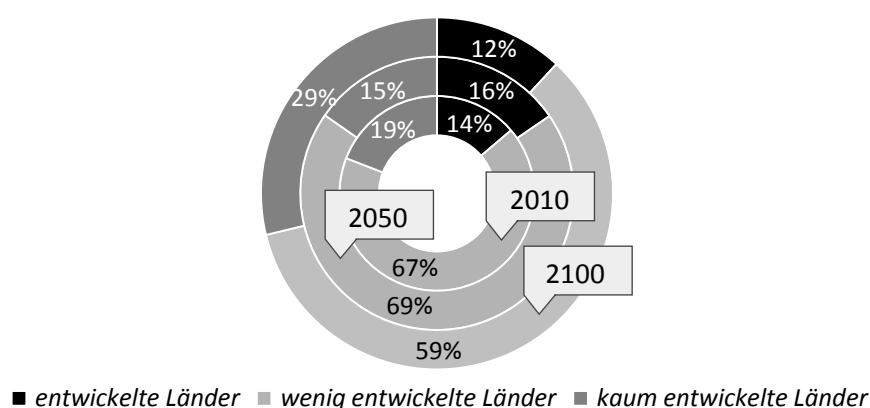


Abbildung 3-5: Verteilung der Bevölkerung nach *entwickelten*, *wenig entwickelten* und *kaum entwickelten* Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante *mittel* [UN 2012]

Als BIP-Wachstumsrate wird der vergangene Trend zugrunde gelegt. Die Wirtschaftswachstumsrate von *wenig entwickelten* Ländern betrug seit 1960 jährlich 0,96 % (Tabelle 3-3). In *entwickelten*

Ländern ist ein Zuwachs von 2,42 % zu beobachten. Am stärksten stieg die Wirtschaftsleistung in sich *entwickelnden* Ländern mit 2,91 % pro Jahr an. Es erfolgt keine Nutzung der *Stillen Reserve*.

Tabelle 3-3: Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der *Stillen Reserve* im Szenario *Baserun*

BIP Wachstumsrate ab 2011 [%]	<i>wenig entwickelt</i>	0,96
	<i>sich entwickelnd</i>	2,91
	<i>entwickelt</i>	2,42
Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> [%]		nein

Das Szenario *Baserun* zeigt, dass bis 2055 die globale Kupfernachfrage von dem Primär- und Sekundärkupfer gedeckt werden kann (Abbildung 3-6). In den Folgejahren werden die geogenen Reserven erschöpft sein und das durch Recycling rückgeführte Kupfer kann lediglich noch einen Bruchteil der Nachfrage decken.

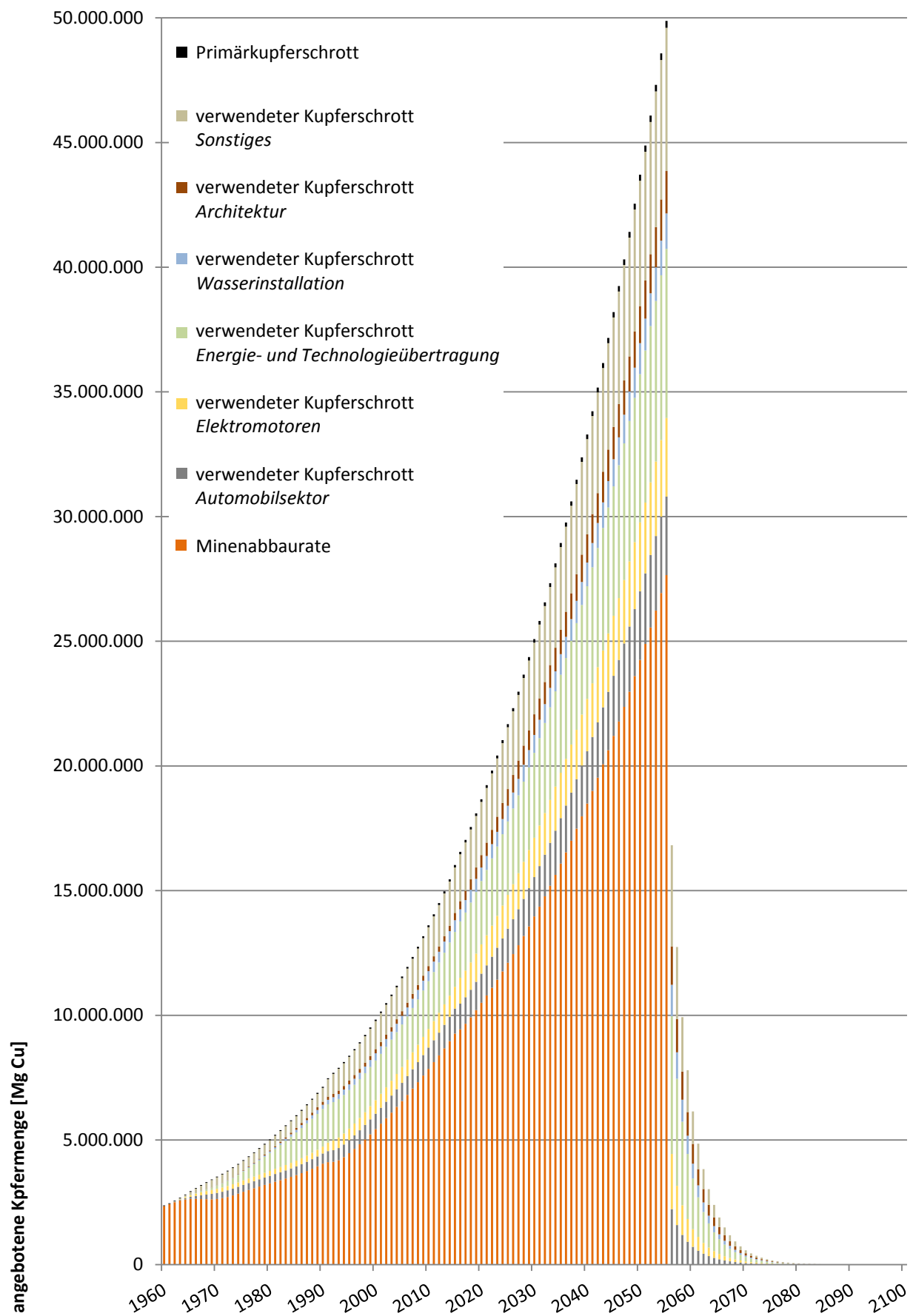


Abbildung 3-6: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario *Baserun*

Vor allem zu Beginn des Modellierungsszenarios ist der Anteil des wiederverwendeten Kupfers sehr gering, da in der Modellannahme aufgrund fehlender empirischer Daten kein vorhandenes Kupfer in Kupferanwendungen angenommen wird. Nach der Modellierung der Produktausfallquoten mit der Weibull-Verteilung steigt der Anteil an rezykliertem Kupfer relativ schnell an.

Abbildung 3-7 zeigt die prozentualen Anteile der einzelnen Anwendungen unter Berücksichtigung der Produktlebensdauer des Sekundärkupferschrotts. Da die Kupferanwendung *Sonstiges* anteilmäßig mit über einem Drittel vertreten und auch die durchschnittliche Produktlebensdauer von 10 Jahren relativ gering ist, stammen bereits nach 3 Jahren über 1 % des gesamten Kupferangebotes aus aus-rangierten Kupferanwendungen *Sonstiges*. Nach 10 Jahren sind knapp 10 % des Kupfers aus diesem Bereich. Der *Automobilsektor* und *Elektromotoren* haben ebenfalls aufgrund der geringeren Produktlebensdauer einen Anteil am Gesamtkupferangebot von 6,8 bzw. 4,7 %. Die gesamte Menge an rezykliertem Kupfer lag 1968 bei 20 %. Bis 1985 stammen knapp 40 % des Kupfers aus Sekundärkupfer. Die *Energie- und Technologieübertragung* ist mit rund 19 % vertreten. Bis zur Erschöpfung des globalen Primärkupfers im Jahr 2055 beläuft sich der Anteil des Sekundärkupfers am Gesamtangebot auf 44 % (Abbildung 3-6). *Sonstiges* und *Energie- und Technologieübertragung* spielen dabei mit 13,6 % die wichtigste Rolle (Abbildung 3-7). Aufgrund der geringen Anteilsmenge an *Architektur* und der langen Produktlebensdauer von *Architektur* und *Wasserinstallation* ist die Bedeutung dieser Kupferanwendungen mit jeweils um die 3 % relativ gering.

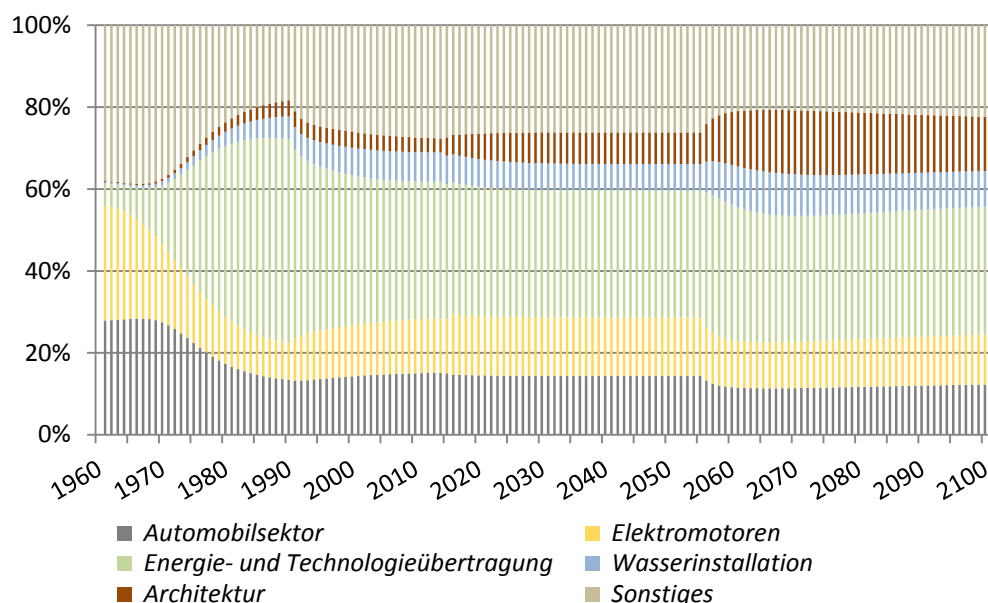


Abbildung 3-7: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario *Baserun*

Die Wiederverwendungsrate (engl. *reuse rate*) schwankt je nach Anwendung zwischen 23,1 % bei *Wasserinstallation* und 61,6 % bei *Architektur*. Im Szenario *Baserun* findet keine Variierung der Wiederverwendungsrate statt, daher die konstanten Werte.

Die weltweite Kupfernachfrage pro Kopf steigt bis zum Modellierungsende stark an (Abbildung 3-8). Wenn das Wirtschaftswachstum der drei Regionen wie in der Vergangenheit verläuft, wird in den *entwickelten* Ländern in den kommenden Jahren eine Sättigung stattfinden und dort der Kupferkonsum stagnieren bzw. zurückgehen. Jedoch wird der Anstieg des Faktors Bevölkerungswachstum

die globale Kupfernachfrage in sich *entwickelnden* Ländern stark erhöhen. Der durchschnittliche Trend der letzten 50 Jahre wird hier als Grundlage verwendet. Dabei findet die prosperierende Entwicklung, die vor allem im letzten Jahrzehnt auftritt, keine spezielle Berücksichtigung. Aufgrund der sich erschöpfenden geogenen Reserven wird, wie Abbildung 3-6 zeigt, die globale Nachfrage nach Kupfer ab 2056 nicht gestillt werden können. Die Lage des weltweiten Kupfermarktes wird sich zuspitzen und das Kupferangebot nach den getroffenen Annahmen knapp werden.

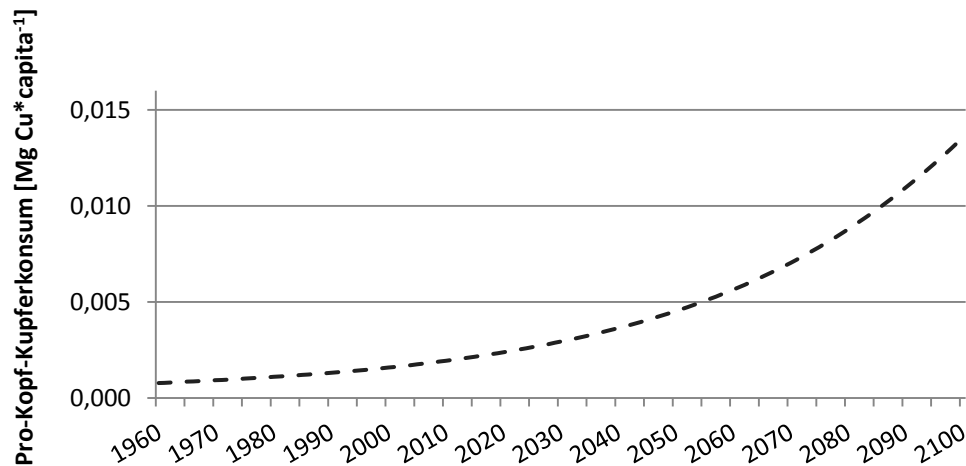


Abbildung 3-8: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [Mg Cu*capita⁻¹] im Szenario *Baserun*

Das nicht wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführte Kupfer, welches in der *Stillen Reserve* lagert, steigt im Lauf der Modellierung erheblich an. Es findet eine Verlagerung der geogenen Reserven hin zu urbanen anthropogenen Lagerstätten statt. Aufgrund der geringen Produktlebenszyklen von *Sonstiges*, *Elektromotoren* und dem *Automobilsektor* liegt deren relativer Anteil an der kumulierten *Stillen Reserve* zu Beginn bei ca. 38 % und ab 2015 bei je 28 %. 1990 stammt etwa ein Viertel des nicht recycelten Kupfers aus *Sonstiges*. Produkte aus der *Energie- und Technologieübertragung* machen über 39 % aus, gefolgt vom *Automobilsektor* und *Elektromotoren* mit 18 % bzw. 12 %. Aufgrund der langen durchschnittlichen Lebensdauer von Produkten der Anwendung *Wasserinstallation* sind etwa 4 % der nicht-wieder zurückgeführten Kupferprodukte aus diesem Segment; aus dem Bereich *Architektur* sind es lediglich 2,5 %.

Nach 1990 wird eine Verschiebung der Kupferanwendung vorgenommen. Der relative Anteil von *Sonstiges* an der kumulierten *Stillen Reserve* ist 2013 leicht auf etwa 26 % angestiegen. *Energie- und Technologieübertragung* rangieren mit 37 % auf Platz eins. Die Menge an *Wasserinstallation* ist minimal auf knapp 6 % angestiegen.

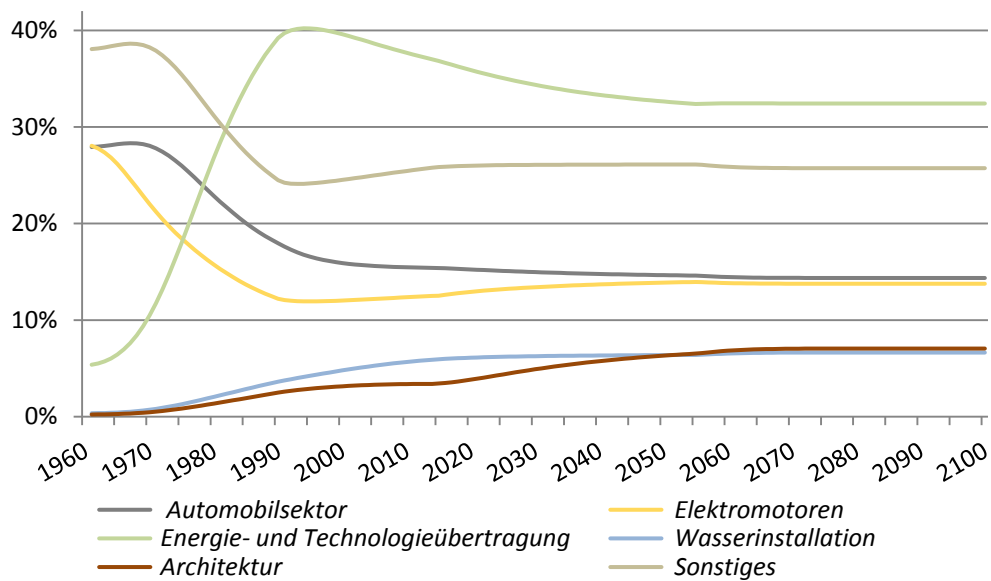


Abbildung 3-9: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der *Stille Reserve* im Szenario *Baserun*

Bis zur Erschöpfung der geogenen primären Reserven 2055 stammen rund 26 % der *Stille Reserve* aus der Anwendung *Sonstiges*. Der Anteil an *Energie- und Technologieübertragung* liegt bei einem Drittel. *Wasserinstallation* rangiert mit über 6 % neben der *Architektur* auf den letzten Plätzen. Der *Automobilsektor* und *Elektromotoren* sind mit jeweils etwa 14 % vertreten. Dieser Trend verändert sich bis zum Modellierungsende nur sehr geringfügig, da der Anteil an neu exploriertem Kupfer nur sehr klein ist und die globale Nachfrage nicht durch Primärkupfer gedeckt werden kann. Das anthropogen gelagerte Kupfer in der *Stille Reserve* liegt zum Modellierungsende bei rund 780 Mio. Mg Cu.

3.3 Szenario Hohes Wachstum

Das Szenario *Hohes Wachstum* geht davon aus, dass die Weltbevölkerung stark wächst, die Weltwirtschaft große Zuwachsraten aufweist und aufgrund des steigenden Wohlstandes die Produkte kürzer Verwendung finden und das Recycling nicht die höchste Priorität hat.

Tabelle 3-4: Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario Hohes Wachstum

Produktlebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	8
	<i>Elektromotoren</i>	7
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	45
	<i>Wasserinstallation</i>	60
	<i>Architektur</i>	60
	<i>Sonstiges</i>	9
Sammelquote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	75
	<i>Elektromotoren</i>	80
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	70
	<i>Wasserinstallation</i>	10
	<i>Architektur</i>	60
	<i>Sonstiges</i>	40

Nach 2015 wird knapp die Hälfte des verwendeten Kupfers in *Sonstiges*, *Elektromotoren* und *Architektur* appliziert (Abbildung 3-10). Durch den wirtschaftlichen Zuwachs wird der Bedarf an *stationären Elektromotoren* für Maschinenantriebe, Förderbänder und Stellantriebe stark wachsen. Der Anteil an Kraftwerken, Wind- und Solaranlagen und Strom- bzw. Datenkabeln wird 28 % der Kupferanwendungen ausmachen. In Rohren, Fittings oder Messingarmaturen werden rund 10 % des Kupfers verbaut. Der Anteil an *Architektur* macht lediglich 0,5 % aus.

Die Produktzyklen verkürzen sich aufgrund des steigenden weltweiten Wohlstandes (Abbildung 3-2). Sowohl *PKW* als auch *Elektromotoren* und *Sonstiges* haben eine Verwendungsdauer von jeweils unter 10 Jahren. In der *Energie- und Technologieübertragung* wird das Kupfer durchschnittlich rund 45 Jahre gebraucht, bis es ausrangiert wird. Für *Wasserinstallation* und *Architektur* wird eine Nutzungsdauer von 60 Jahren angenommen.

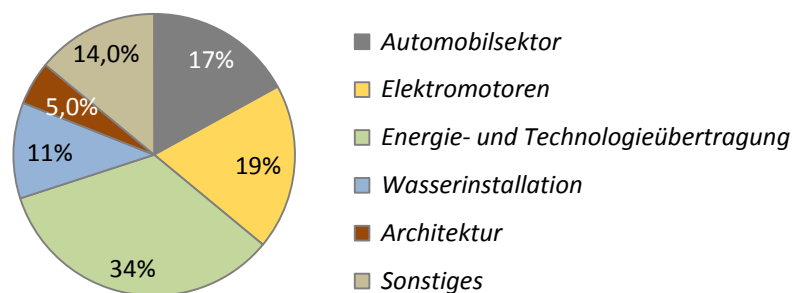


Abbildung 3-10: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios Hohes Wachstum

Die Sammelquoten variieren leicht im Vergleich zum *Baserun*-Szenario. *Elektromotoren* werden mit einer Sammelquote von 80 % vermehrt dem Sekundärkreislauf zugeführt, drei von vier Autos ebenso. Die *Energie- und Technologieübertragung* wird in 75 % der Fälle eingesammelt, bei der *Architektur* sind es rund 60 %. Die Sammelquote von Haushaltsgeräten, Leiterplatten oder Gefrierschränken (*Sonstiges*) beläuft sich in diesem Szenario lediglich auf 10 %, da aufgrund des Wohlstandes eine Wiederverwendung nur sehr mäßig stattfindet.

In der UN-Variante *hoch* nimmt der Anteil an Menschen, die in *wenig entwickelten* bzw. *entwickelten* Ländern leben, von 2010 bis 2050 relativ gesehen um 2 % bzw. 4 % ab (Abbildung 3-11). Hingegen nimmt der Anteil an Menschen aus *kaum entwickelten* Ländern bis 2050 um ein Drittel zu. Bis 2050 verlangsamt sich das gesamte Bevölkerungswachstum allerdings bei der Variante *hoch*. Rund 54 % mehr Menschen besiedeln 2050 die Erde (insgesamt 10,6 Mrd. Menschen).

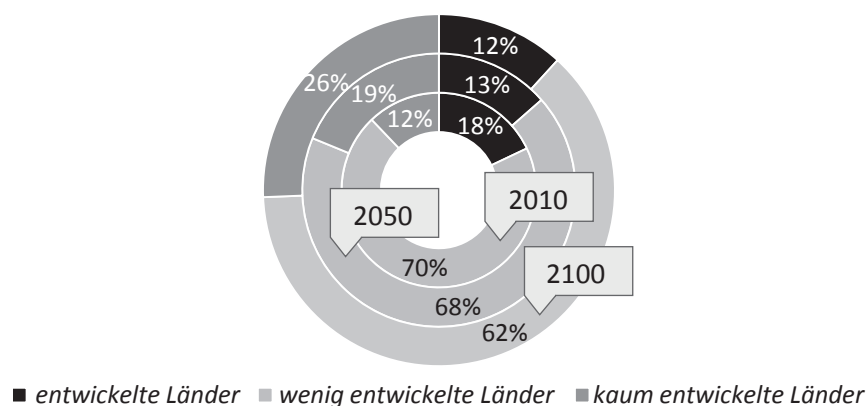


Abbildung 3-11: Verteilung der Bevölkerung nach entwickelten, wenig entwickelten und kaum entwickelten Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante hoch [UN 2012]

Das Wirtschaftswachstum in *sich entwickelnden* Ländern steigt auf 5,5 % pro Jahr, *entwickelte* Länder weisen ein jährliches Wachstum von 3,2 % auf (Tabelle 3-5). Die Annahme für *wenig entwickelte* Länder geht von einem Anstieg um 2,7 % aus.

Tabelle 3-5: Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der Stillen Reserve im Szenario Hohes Wachstum

BIP Wachstumsrate ab 2011 [%]	wenig entwickelt	2,7
	sich entwickelnd	5,5
	entwickelt	3,2
Nutzung der Stillen Reserve [%]		nein

Beim Szenario *Hohes Wachstum* reicht die geogene Reservebasis bis 2045. Danach wird dieses Vorkommen aufgrund der großen Nachfrage, basierend auf der prosperierenden Weltwirtschaft, erschöpft sein (Abbildung 3-12).

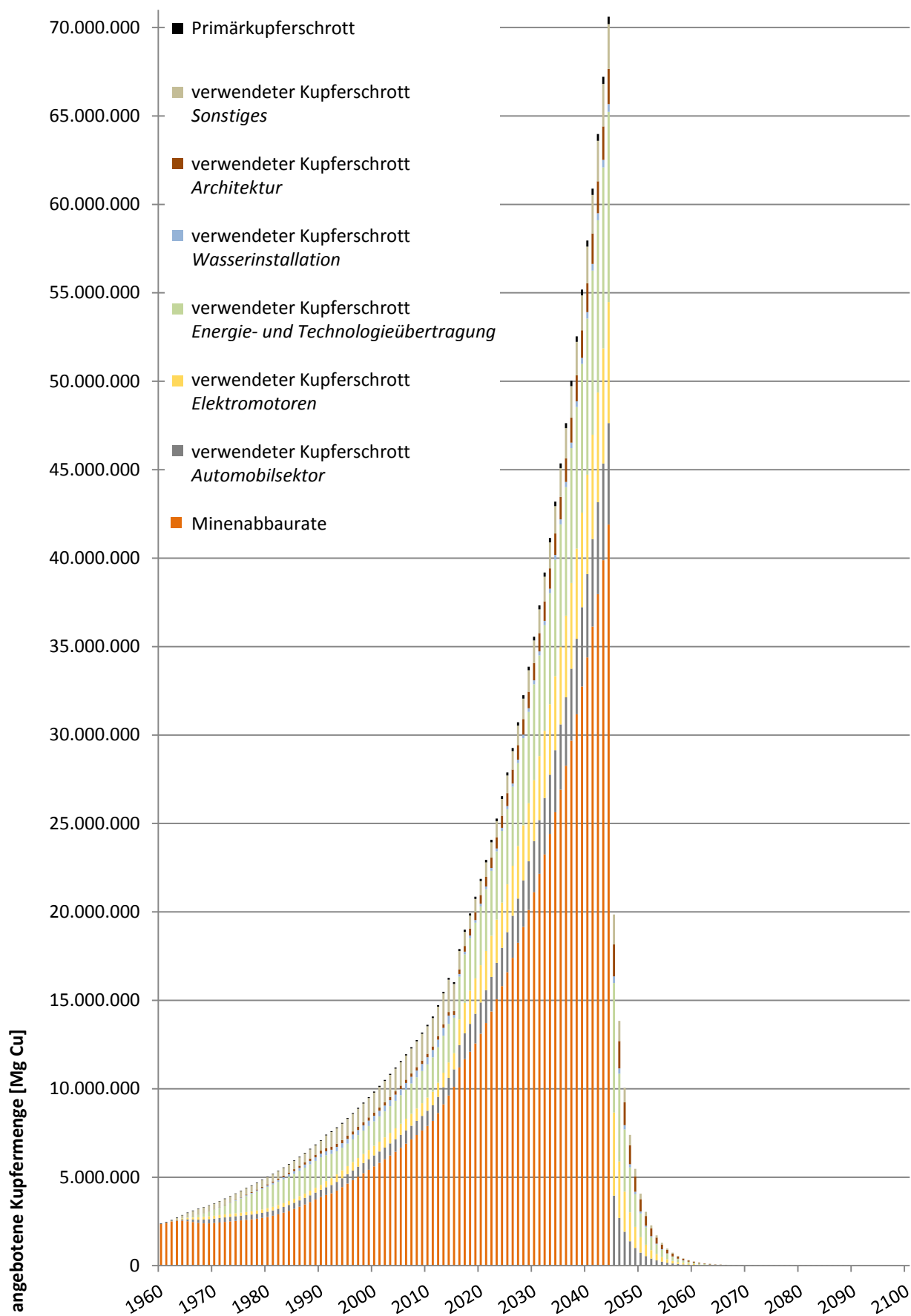


Abbildung 3-12: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario *Hohes Wachstum*

In den ersten 6 Jahren ist der Anteil von Kupfer in *Sonstiges* sehr hoch und liegt zwischen 35 und knapp 48 % (Abbildung 3-13). Die Produktlebensdauer wird mit 9 Jahren angenommen. Rund ein Viertel des abgebauten Kupfers wird in *Sonstiges* verwendet. Dadurch, dass *Wasserinstallation* und *Architektur* eine durchschnittliche Lebensdauer von 60 Jahren haben, ist zu Beginn der Modellierung der Anteil unter 1 %. Die Sammelquote von *Wasserinstallation* liegt lediglich bei 10 %, daher beläuft sich der Anteil am Sekundärkupfer in dem kompletten Modellierungszeitraum unter 7 %. Ab 1990 bis 2020 ist der Anteil an *Wasserinstallation* am größten. Dies lässt sich durch den Anteil von 14 % der Kupferanwendungen von 1960 bis 1990 und der durchschnittlichen Lebensdauer von 45 Jahren erklären. Die hier verwendete Weibull-Funktion berücksichtigt dies.

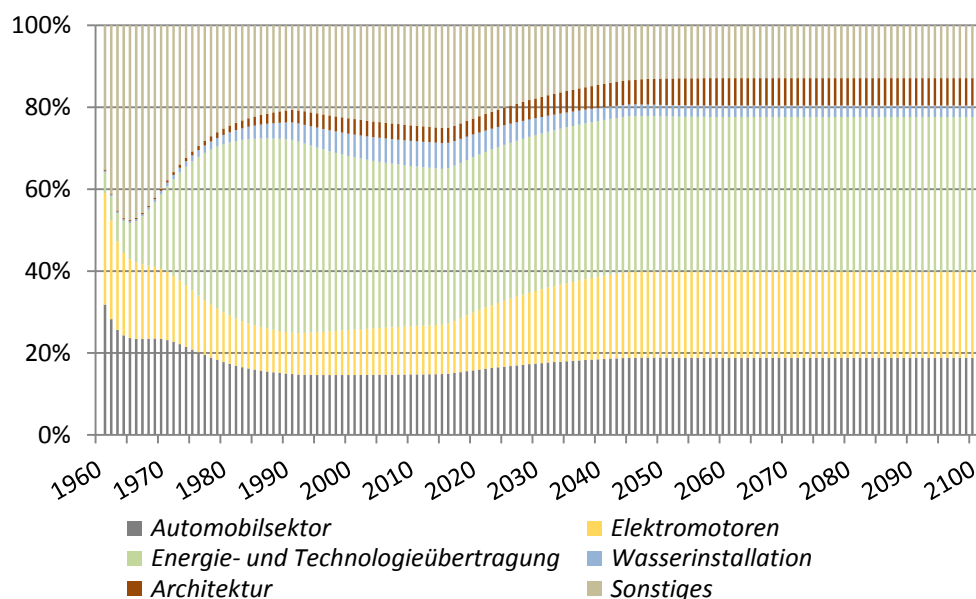


Abbildung 3-13: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario Hohes Wachstum

Die Anteilsverschiebungen ab 2015 werden besonders deutlich bei *Sonstiges*. Da angenommen wird, dass lediglich 14 % des verwendeten Kupfers in diese Anwendung fließen und die Produktlebensdauer nur bei 9 Jahren liegt, fallen die relativen Anteile ab 2050 auf unter 13 %. Die *Energie- und Technologieübertragung* macht ab 2015 mit rund 38 % mengenmäßig den größten Anteil aus (Abbildung 3-12); der *Automobilsektor* und *Elektromotoren* liegen bei etwa 20 %.

2045 wird der Peak des Kupferangebotes und somit auch des -konsums erreicht. Es werden in diesem Jahr rund 42 Mio. Mg Cu geogen gewonnen. Insgesamt liegt das primäre und sekundäre Angebot bei über 71 Mio. Mg Cu. Dieser Trend wird durch das starke Wirtschaftswachstum hervorgerufen (Abbildung 3-14). In dem Jahr könnte der Pro-Kopf-Kupferkonsum bei etwa 7 kg liegen. Da mit zunehmendem Wohlstand die Annahme getroffen wird, dass Kupfer aufgrund von technologischem Fortschritt und Substitution weniger nachgefragt wird, könnte um 2090 das Maximum erreicht sein. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Nachfrage allein durch das geogen noch vorhandene Kupfererz nicht gedeckt werden kann. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Annahme des hohen Bevölkerungswachstums vor allem in *kaum entwickelten* Ländern und das große jährliche Wirtschaftswachstum von 2,7 %. In den sich *entwickelnden* Ländern ist das BIP-Wachstum mit 5,5 % sehr hoch und lässt die globale Nachfrage enorm ansteigen.

Bei dem Szenario *Hohes Wachstum* wird eine kürzere durchschnittliche Produktlebensdauer aufgrund des wirtschaftlichen Wohlstandes angenommen. Gleichzeitig nehmen die Sammelquoten bis auf die Anwendung *Elektromotoren* im Vergleich zu *Baserun* ab. Durch die verkürzten Produktlebenszyklen sind die potenziellen sekundären Stoffkreisläufe schneller geschlossen.

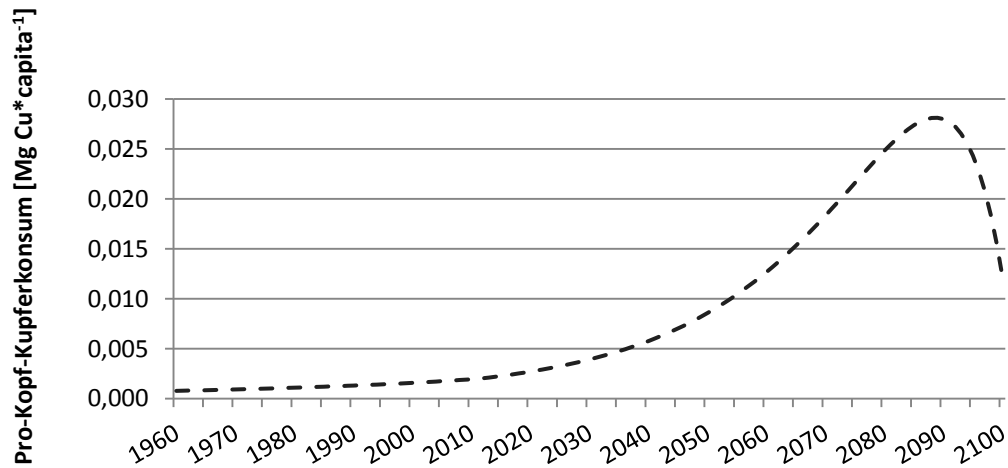


Abbildung 3-14: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [Mg Cu*capita⁻¹] im Szenario *Hohes Wachstum*

Die *Stille Reserve* beträgt am Modellierungsende knapp 700 Mio. Mg Kupfer. Dieses potenzielle Rohstofflager wird in diesem Szenario nicht als anthropogene Mine angesehen und wird daher nicht weiter verwendet. Abbildung 3-15 zeigt die zeitliche Verschiebung der einzelnen Kupferanwendungen. Zu Beginn ist der Anteil von *Sonstiges*, *Automobilsektor* und *Elektromotoren* am größten. Dies basiert auf den kürzeren Produktlebensdauern. Da der Anteil von *Sonstiges* an den verwendeten Kupferapplikationen ab 2015 um mehr als die Hälfte herabgesetzt wird, sinkt der relative Anteil an Kupfer in der *Stillen Reserve*, der aus dem Bereich *Sonstiges* stammt, auf etwa 13 % ab. Hingegen steigen die relativen Mengen an *Elektromotoren* und *Automobilsektor* von 10 % bzw. 15 % im Jahr 1990 auf rund 20 % an. Der Anteil an *Wasserinstallation* an der *Stillen Reserve* liegt ab 2023 bei unter 5 %. Dies entspricht einer absoluten Menge von 11,5 Mio. Mg Cu. Ab 2015 steigt der Anteil an *Energie- und Technologieübertragung* auf etwa ein Drittel der verwendeten Kupferprodukte an. Der Anteil an der *Stillen Reserve* steigt auf etwa 38 %. *Architektur* steigt im Zeitverlauf an, ab 1990 beträgt der relative Anteil 3 %. Bis 2100 findet eine Verdopplung statt, in absoluten Zahlen entspricht dies einer Menge von 46 Mio. Mg Cu.

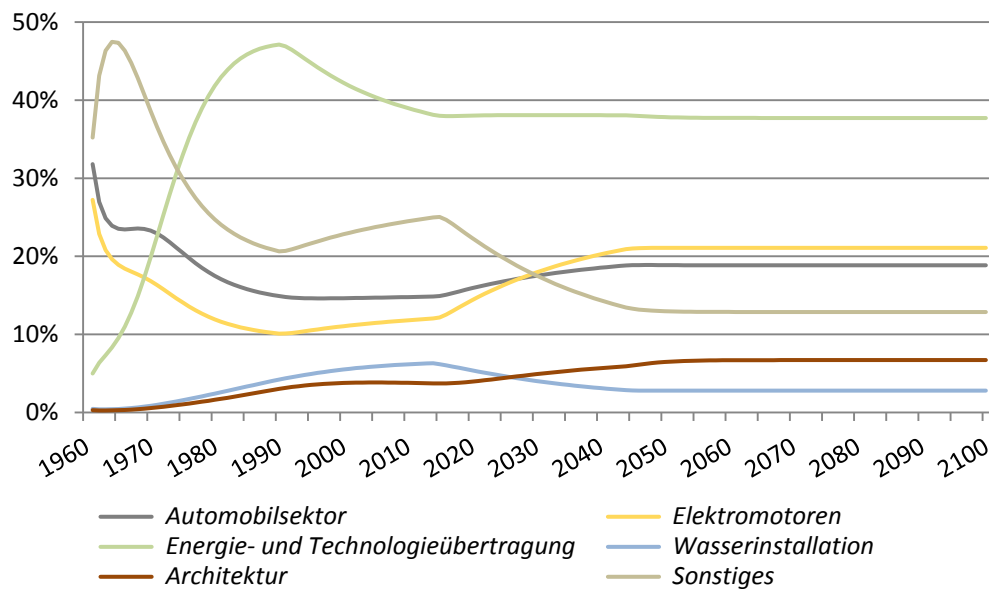


Abbildung 3-15: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers nach Anwendungen in der *Stille Reserve* im Szenario *Hohes Wachstum*

3.4 Szenario Globale Nachhaltigkeit

Das Szenario *Globale Nachhaltigkeit* sieht ein nachhaltigeres Wirtschaften vor. Die Produktlebensdauern erhöhen sich und die Sammelquote wird ebenfalls angehoben. Beim Szenario *Globale Nachhaltigkeit* machen die Kupferapplikationen *Sonstiges* und *Energie- und Technologieübertragung* über zwei Drittel des Kupfergebrauchs aus. Besonders der Ausbau von Wind- und Solaranlagen benötigt große Mengen an Kupfer. *Stationäre Elektromotoren* machen 13 % aus. Aufgrund des Nachhaltigkeitsaspektes nimmt der *Automobilsektor* lediglich ein Zehntel der Kupferanwendungen ein. Die Produktlebenszyklen verlängern sich (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Übersicht der variierten Parameterwerte im Szenario *Globale Nachhaltigkeit*

Produktlebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	15
	<i>Elektromotoren</i>	11
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	60
	<i>Wasserinstallation</i>	50
	<i>Architektur</i>	100
	<i>Sonstiges</i>	14
Sammelquote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	90
	<i>Elektromotoren</i>	80
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	90
	<i>Wasserinstallation</i>	40
	<i>Architektur</i>	85
	<i>Sonstiges</i>	60
BIP Wachstumsrate ab 2011 [%]	<i>wenig entwickelt</i>	2
	<i>sich entwickelnd</i>	4
	<i>entwickelt</i>	1,5
Nutzung der Stillen Reserve [%]		1

Die Nutzung im *Automobilsektor* beträgt etwa 15 Jahre, die Kupferapplikationen in *Sonstiges* im Schnitt 14 Jahre. Im *Architektur*sektor beträgt der Produktionszyklus rund 100 Jahre. Bei der *Energie- und Technologieübertragung* beläuft er sich auf rund 60 Jahre.

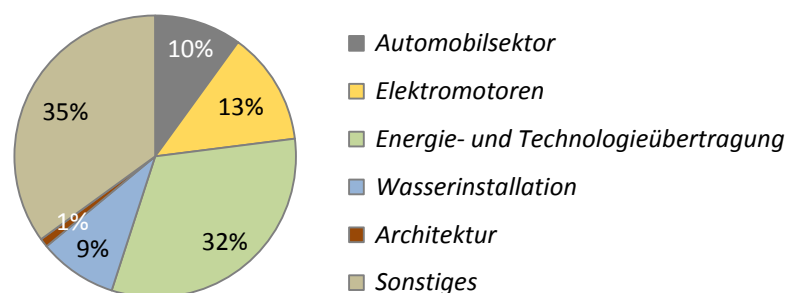


Abbildung 3-16: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios *Globale Nachhaltigkeit*

Der Aspekt der Nachhaltigkeit wird besonders bei Betrachtung der Sammelquoten deutlich. Generell ist der Anteil an Applikationen, die potenziell dem Sekundärkreislauf zugeführt werden können, relativ hoch. Produkte des *Automobilsektors* und der *Energie- und Technologieübertragung* werden zu 90 % gesammelt sowie 85 % der *Architektur* und 80 % der *Elektromotoren*. Aufgrund der komplexen Verbauung werden lediglich 40 % der *Wasserinstallation* gesammelt.

Als Wachstumsprognose der Weltbevölkerung wird auf die *mittlere* UN-Variante zurückgegriffen. Hierbei wird deutlich, dass der Anteil an Menschen aus *kaum entwickelten* Ländern von 12 % 2010 auf 19 % im Jahr 2050 ansteigt (Abbildung 3-5). Rund zwei Drittel der Menschheit wohnen dann in *wenig entwickelten* Ländern (Tabelle Anhang-1).

Das BIP-Wachstum in sich *entwickelnden* Ländern beträgt 5 % (Tabelle 3-6). Die Entwicklung des BIPs von *wenig entwickelten* Ländern wird im Vergleich zur Vergangenheit etwas beschleunigt mit einem jährlichen Wachstum von ca. 2 %. In *entwickelten* Ländern geht die Wirtschaftsleistung etwas zurück auf eine jährliche Wachstumsrate von 1,5 %.

In diesem Szenario wird die Nutzung der *Stillen Reserve* nach Erschöpfung der geogenen Reserven als mögliche Rohstoffquelle implementiert. 2057 wäre aufgrund des zugrunde liegenden Wirtschaftswachstums und Produktlebensdauern der Abbau geogener Kupfererzvorkommen nicht mehr möglich (Abbildung 3-17). Ab diesem Zeitpunkt dienen anthropogene Rohstofflager als Kupferressourcen mit Minencharakter. Da bei der Modellierung auf eine Differenzierung der Kupferanwendungen in der *Stillen Reserve* verzichtet wird, erfolgt ein gleichmäßiger Abbau von jährlich 1 %. Dieser Trend wird in Abbildung 3-18 deutlich. Es findet keine Anteilverschiebung einzelner Kupferanwendungen im Zeitverlauf bis 2057 statt.

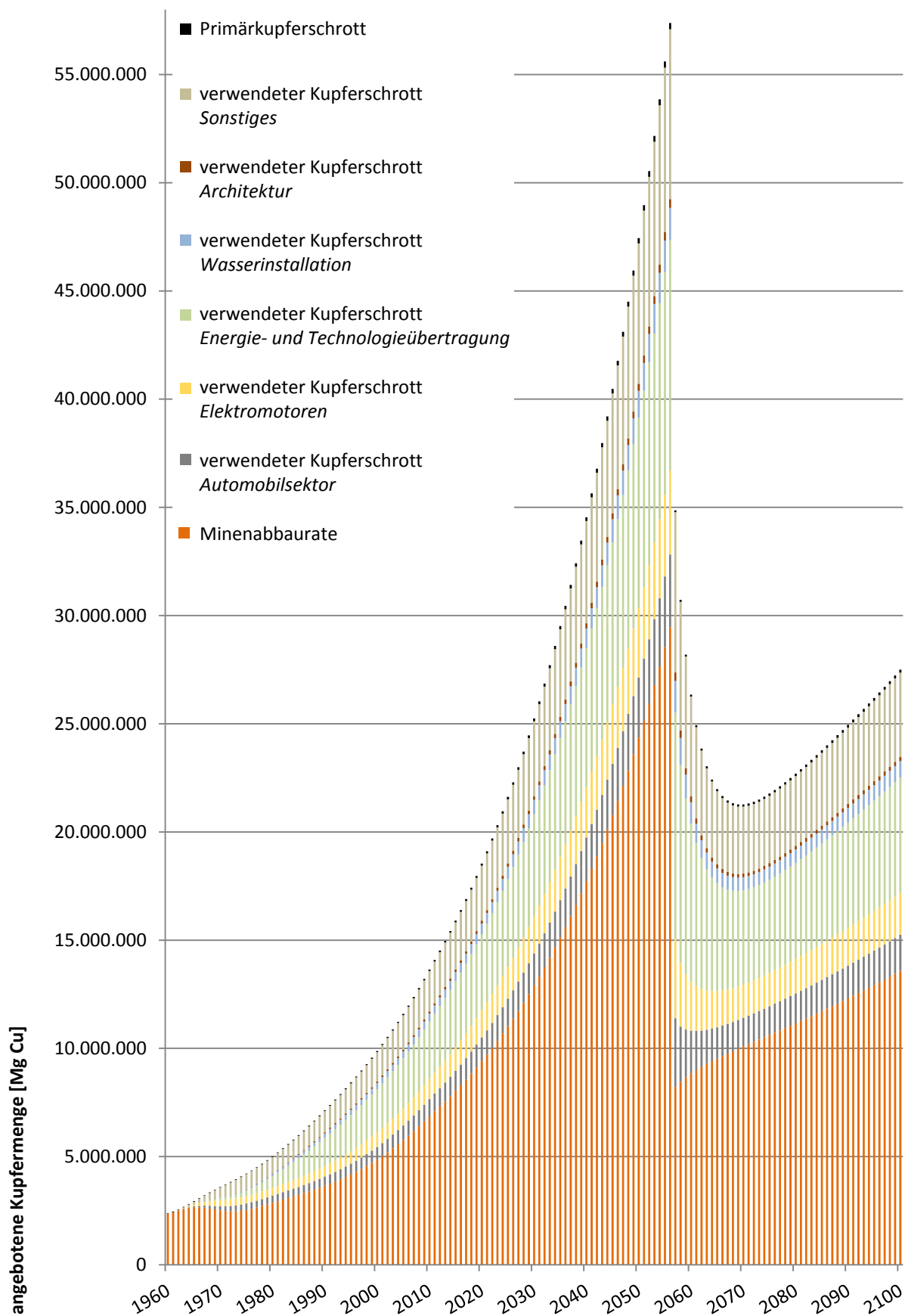


Abbildung 3-17: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario *Globale Nachhaltigkeit*

Zu Beginn der Modellierung stammen etwa 37 % des Kupferschrotts aus *Sonstiges* (Abbildung 3-18). Über die Hälfte des Sekundärkupfers wird durch den *Automobilsektor* und *Elektromotoren* bestimmt. Diese Verteilung verschiebt sich im Zeitverlauf deutlich, basierend auf der Berechnung der charakteristischen Weibull-Funktion und die zugrunde gelegten Produktlebenszyklen. In den Folgejahren stammen rund 25 % aus diesen beiden Anwendungsbereichen. Ende der 1980er Jahre kommt etwa ein Viertel des Sekundärkupferschrotts aus dem Segment *Sonstiges*. Anfang der 1990er nimmt dies etwas ab. Grund hierfür ist die Zunahme der *Sonstigen* Kupferanteile ab 1990 von 24 % auf 35 %. Bis zum Modellierungsende 2100 wird in diesem Segment keine Variierung vorgenommen.

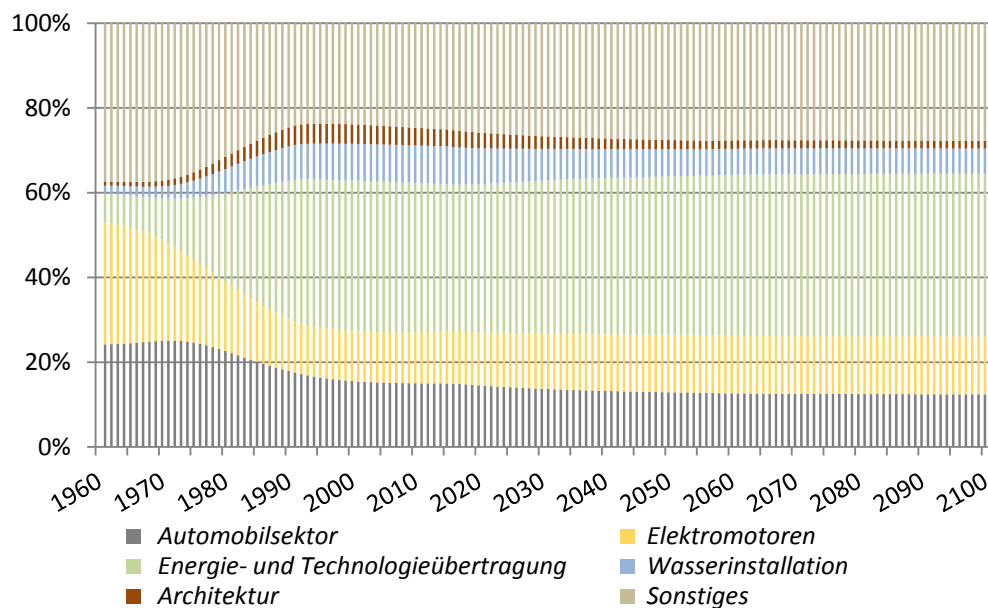


Abbildung 3-18: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario *Globale Nachhaltigkeit*

Ab 1990 nimmt der Anteil an *Architektur* am Sekundärkupferschrott kontinuierlich zu. 2000 liegt er bei fast 5 %. In den folgenden Jahren minimiert sich dieser Anteil allerdings wieder auf unter 2 %. Bei *Globaler Nachhaltigkeit* stammt jedoch auch lediglich 1 % der Kupferanwendungen aus der *Architektur*. *Wasserinstallation* und *Architektur* machen bei den Kupferanwendungen 1990 15 % aus, ab 2015 nur noch 10 %. Die relative Menge am Sekundärkupferschrott liegt ab 1990 zusammen bei 13 % und reduziert sich bis 2060 auf 8 %. Die *Energie- und Technologieübertragung* macht 1990 rund ein Drittel des Sekundärkupferschrotts aus. Dieser Anteil steigt bis zum Modellierungsende auf etwa 38 % an.

Da ab 2057 die globale Nachfrage die geogene Reserve übersteigt und die Erzvorkommen erschöpft sind, wird ab 2060 eine Nutzung der *Stillen Reserve* betrachtet. Da die *Stille Reserve* ubiquitär global lokalisiert sind, wird bei einer Rückbaurate von 1 % lediglich ein geringer Anteil der globalen Nachfrage gedeckt. Für die Gewinnung von Kupfererzen aus anthropogenen Lagerstätten wie Deponien oder urbanen Beständen ist neben dem technologischen Aufwand auch der energetische und ökonomische Aspekt zu berücksichtigen. Da diese Faktoren mit großen Unsicherheiten behaftet sind, werden lediglich Mengen von anfangs etwa 8 Mio. Mg Cu aus anthropogenen Lagerstätten gewonnen und stehen dem globalen Angebot zur Verfügung (Abbildung 3-18). Bis 2100 wird ein Anstieg auf knapp 14 Mio. Mg Cu angenommen. Gleichzeitig werden in Nutzung befindliche Produkte ausrangiert

und stehen dem weltweiten Kupferangebot zur Verfügung. Dabei spielen die Sektoren *Energie- und Technologieübertragung* und *Sonstiges* eine wichtige Rolle, da sie mengenmäßig am häufigsten vertreten sind.

Die Kupfernachfrage steigt aufgrund des weltweit steigenden wirtschaftlichen Wachstums stetig an (Abbildung 3-19). Zum Ende der geogenen Reserven liegt der globale Kupferkonsum auf etwa $6 \text{ kg} \cdot \text{capita}^{-1}$. Dies entspricht einer Nachfrage von über 58 Mio. Mg Cu. Bis 2100 könnte dies bei einer prosperierenden Wirtschaft, basierend auf der zugrunde gelegten Intensität-Nutzungs-Kurve, auf über 200 Mio. Mg Cu steigen. Der Pro-Kopf-Konsum liegt 2100 bei knapp 20 kg Cu.

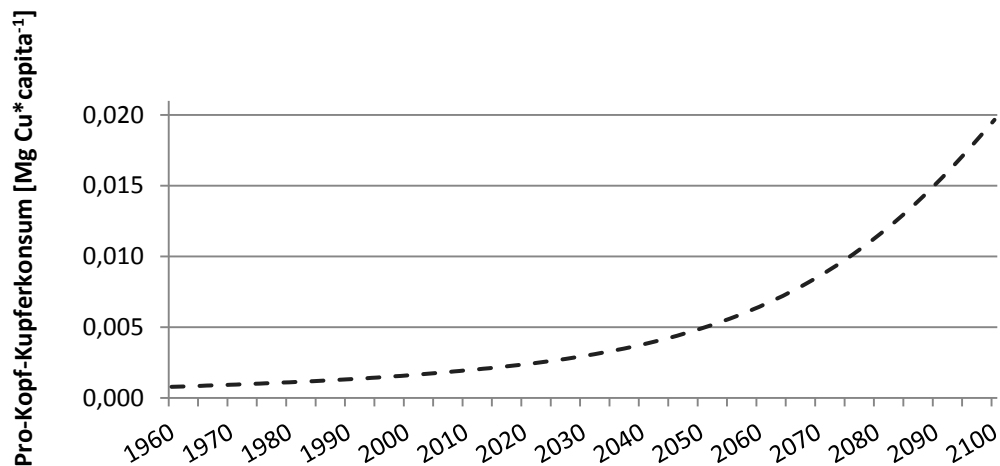


Abbildung 3-19: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Konsums [Mg Cu*capita⁻¹] im Szenario *Globale Nachhaltigkeit*

Zu Beginn der Modellierung ist der relative Anteil an *Sonstiges* an der *Stillen Reserve* aufgrund der kurzen Produktlebensdauer von 14 Jahren mit über der Hälfte am größten (Abbildung 3-20). Dieser nimmt bis 1990 aufgrund der unterschiedlichen Produktlebenszyklen auf rund 38 % ab und steigt bis 2040 auf rund 41 % an. Da die verwendeten Kupferanteile im Bereich *Architektur* von anfänglich 4,5 % ab 1960 bis 2015 auf lediglich 1 % abnehmen und die Wiederverwendungsrate aber von rund 47 % auf 65 % steigt, beläuft sich der prozentuale Anteil an der *Stillen Reserve* auf maximal 2 %.

Da die Wiederverwendungsrate vom *Automobilsektor* im Zeitverlauf leicht ansteigt und der prozentuale Anteil an dem gesamten verwendeten Kupfer auf 10 % reduziert wird, unterschreitet der Anteil an der *Stillen Reserve* ab dem 21. Jahrhundert die 10 %-Marke und liegt zum Modellierungsende bei etwa 8 %. Da die Sammelquote bei *Wasserinstallation* nur bei 40 % liegt und die Rückführungsrate lediglich knapp 31 % beträgt, ist der Anteil zukünftig an der *Stillen Reserve* mit rund 15 % vertreten. Die *Energie- und Technologieübertragung* macht rund ein Viertel der anthropogenen Lager aus.

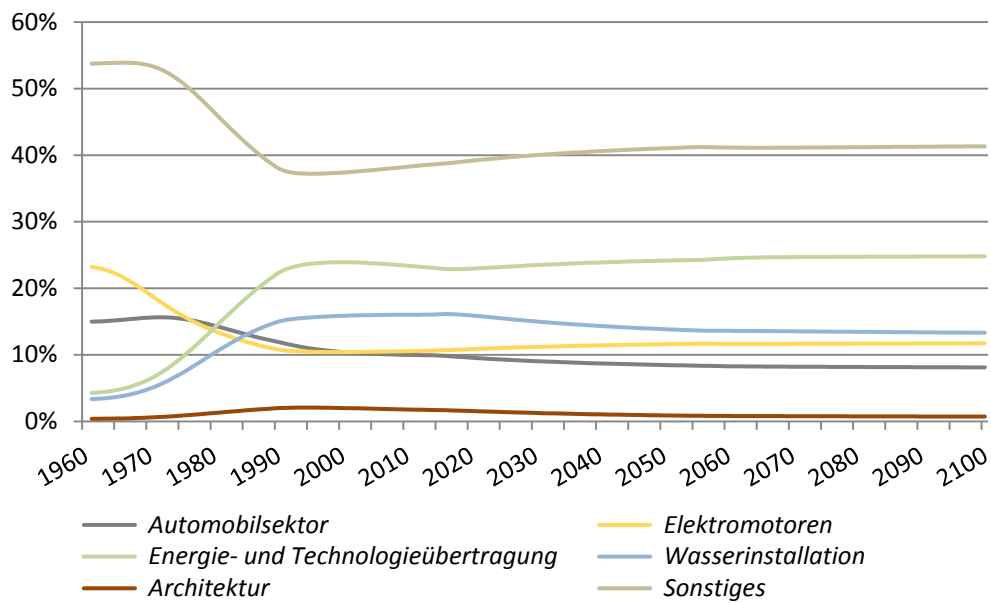


Abbildung 3-20: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der *Stille Reserve* im Szenario *Globale Nachhaltigkeit*

Durch die Verwendung der *Stille Reserve* als Rohstofflager nimmt der Bestand von über 800 Mio. Mg Cu im Jahr 2057 auf rund 350 Mio. Mg Cu zum Ende der Modellierung ab. Die rasante Abnahme der *Stille Reserve* ist mit der ökonomischen Prosperität und der daraus resultierenden Nachfrage zu erklären. Jährlich wird lediglich 1 % der *Stille Reserve* wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Eine Deckung der modellierten globalen Nachfrage kann dadurch nicht komplett erfolgen. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Kupferanwendungen findet nicht statt, da bei der Modellierung lediglich die generelle Nutzung betrachtet wird.

3.5 Szenario *Pluralismus*

Das Szenario *Pluralismus* sieht eine Erhöhung der Produktlebenszyklen bei einem geringem Bevölkerungswachstum vor. Die Sammelquote wird ebenfalls erhöht. Beim *Pluralismus*-Szenario ist der Anteil an den Kupferapplikationen *Sonstiges* mit rund 44 % sehr groß (Abbildung 3-21). Hierbei wird davon ausgegangen, dass zukünftig der Anteil an LKW, Haushaltsgeräten, Mikrochips etc. stark zunimmt. Der *Automobilsektor* und die *Energie- und Technologieübertragung* machen rund 38 % der Kupferanwendungen aus. Die *stationären Elektromotoren* werden mit 11 % beziffert. *Architektur* und *Wasserinstallation* machen zusammen lediglich 7 % aus. Ihr Produktlebenszyklus beträgt im Durchschnitt 90 Jahre (Abbildung 3-2). Die Nutzungsdauer von *Energie- und Technologieübertragung* wird mit 70 Jahren modelliert. Kupferapplikationen *Sonstiges* haben in diesem Szenario ein hohes Durchschnittsalter von 20 Jahren.

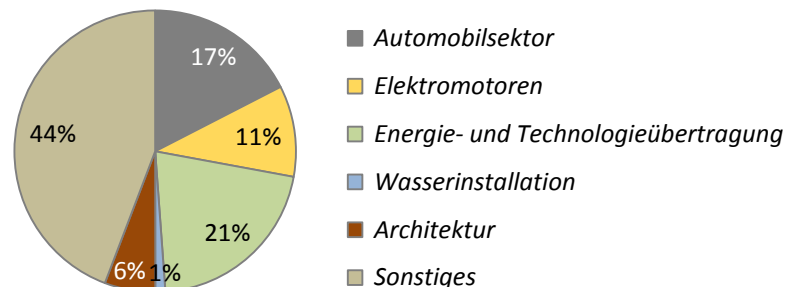


Abbildung 3-21: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios *Pluralismus*

Die Sammelquoten variieren zwischen 35 und 75 % (Tabelle 3-7). Die geringste Quote weist das Segment *Wasserinstallation* mit 35 % auf. *Sonstiges* und *Elektromotoren* werden zu 55 bzw. 60 % gesammelt. Kupferanwendungen im *Automobilsektor* und im *Architekturbereich* werden zu 70 % eingesammelt sowie drei Viertel der *Energie- und Technologieübertragung*.

Tabelle 3-7: Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario *Pluralismus*

Produktlebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	11
	<i>Elektromotoren</i>	6
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	70
	<i>Wasserinstallation</i>	90
	<i>Architektur</i>	90
	<i>Sonstiges</i>	20
Sammelquote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	70
	<i>Elektromotoren</i>	60
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	75
	<i>Wasserinstallation</i>	35
	<i>Architektur</i>	70
	<i>Sonstiges</i>	55

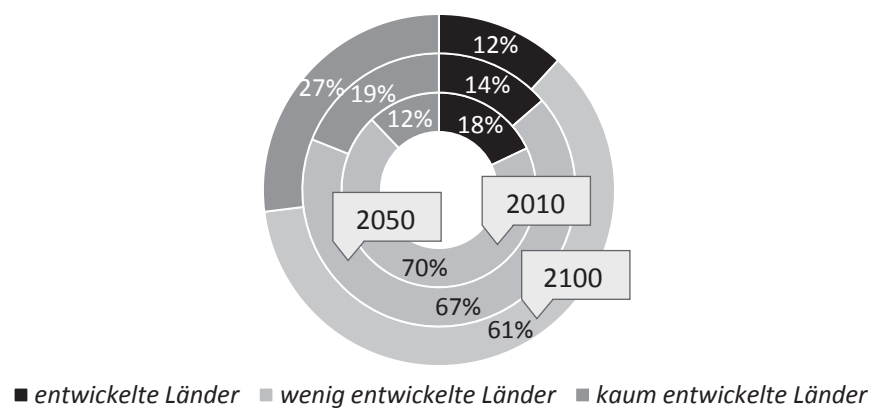


Abbildung 3-22: Verteilung der Bevölkerung nach entwickelten, wenig entwickelten und kaum entwickelten Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante *niedrig* [UN 2012]

Als UN-Variante für die Bevölkerungsentwicklung wird die mit *niedrigem* Wachstum gewählt (Abbildung 3-22). Die relativen Verteilungen der drei Entwicklungskategorien sind identisch mit denen der mittleren Variante. Lediglich die absoluten Zahlen liegen deutlich unter dem Niveau der mittleren Variante. Der Zuwachs von 2010 zu 2030 beträgt rund 14 %, bis 2050 insgesamt 18 %. Demnach wohnen 2050 rund 8,1 Mrd. Menschen auf der Erde. Dies sind im Vergleich zur mittleren Variante rund 1,2 Mrd. Menschen weniger.

Das jährliche Wirtschaftswachstum in *wenig entwickelten* Ländern beträgt 1,3 %, in *entwickelten* Ländern lediglich 1 % (Tabelle 3-7). Die Prognose für sich *entwickelnde* Länder besagt einen Anstieg des BIPs von 3,5 %. Eine Nutzung der *Stillen Reserve* erfolgt in diesem Szenario nicht.

Tabelle 3-8: Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der *Stillen Reserve* im Szenario *Pluralismus*

BIP Wachstumsrate ab 2011 [%]	wenig entwickelt	1,3
	sich entwickelnd	3,5
	entwickelt	1
Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> [%]		nein

Da die Produktlebensdauer von 6 Jahren bei *Elektromotoren* angenommen wird, ist der Anteil dieser Kupferanwendung am Sekundärkupferschrott zu Modellierungsbeginn mit über der Hälfte sehr groß. Dieser Trend flacht im Zeitverlauf deutlich auf etwa 13 % ab (Abbildung 3-23). In den 1970er Jahren steigt der Anteil an Sekundärkupferschrott aus dem *Automobilsektor* auf ca. 34 % an. Die angenommene durchschnittliche Produktlebensdauer liegt bei dieser Anwendung bei 11 Jahren. Ab dem 21. Jahrhundert liegt der Anteil bei rund 16 %. Die *Energie- und Technologieübertragung* hat in diesem Szenario die höchste durchschnittliche Lebensdauer von 70 Jahren. Dies wird dadurch deutlich, dass erst nach rund 30 Jahren der prozentuale Anteil am Sekundärkupferschrott bei über 30 % liegt. Bis 2100 geht diese Entwicklung auf rund 27 % zurück. *Sonstiges* ist anteilig an den verwendeten Kupferprodukten im Zeitverlauf am stärksten vertreten. Die Produktlebensdauer liegt mit 20 Jahren ebenfalls deutlich über den Annahmen der anderen Szenarien. Dies wird bei

Betrachtung von Abbildung 3-23 ersichtlich. 1980 stammte knapp ein Drittel des Sekundärkupferschrotts aus *Sonstiges*. In den 1990er Jahren bis 2040 geht der Anteil zwar etwas zurück, aber beläuft sich bis 2100 auf über 34 %. Da ab 2015 der Anteil an Kupfer in *Wasserinstallation* von 13 % auf 1 % sinkt, ist der Anteil am Sekundärkupfer ab 2050 unter 3 %; *Architektur* macht hier über 7 % aus.

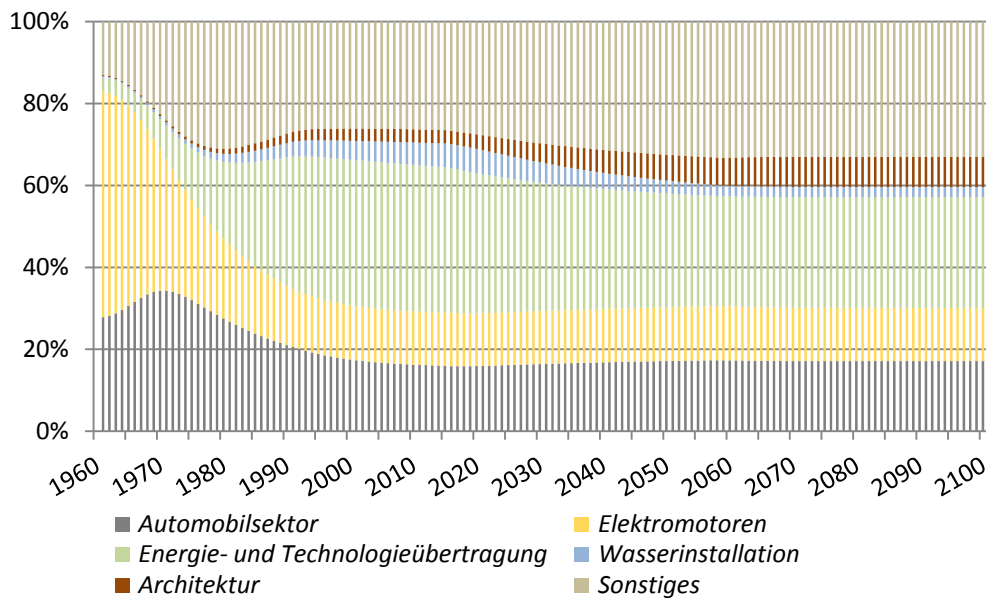


Abbildung 3-23: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario *Pluralismus*

Ab 2057 werden die geogenen Reserven erschöpft sein. Ein Minenabbau aus anthropogenen Lagern ist in diesem Modell nicht vorgesehen (Abbildung 3-24). Durch die Variabilität der Produktlebensdauern strömt immer noch Sekundärkupfer auf den Markt, allerdings kann die globale Nachfrage nicht mehr gedeckt werden. 2057 werden rund 24 Mio. Mg Cu geogen gewonnen. Über 15 Mio. Mg Cu stammen demnach aus Sekundärkupferschrott. Mengenmäßig ist *Sonstiges* mit 5,5 Mio. Mg Cu 2057 beim Sekundärkupfer am häufigsten.

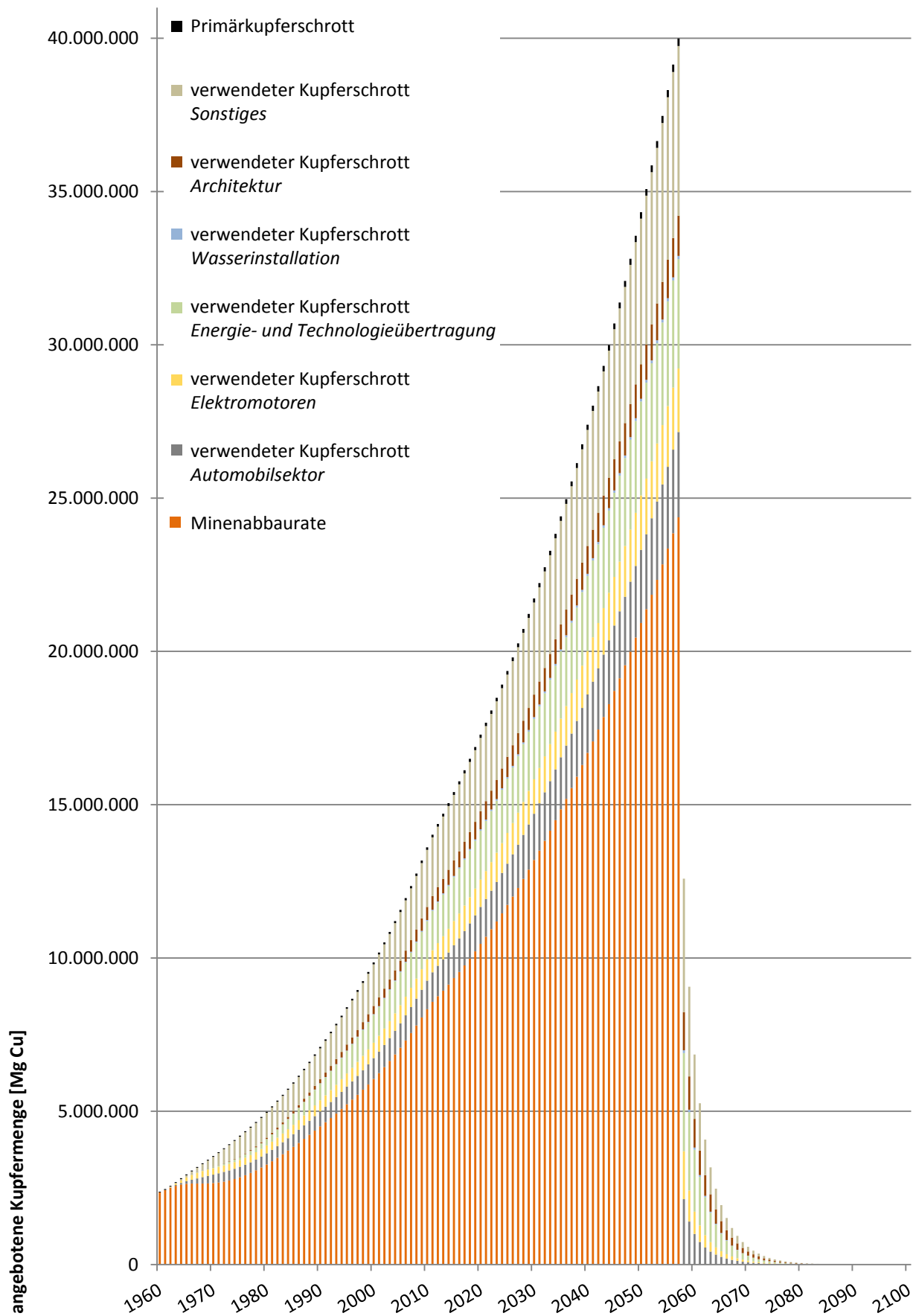
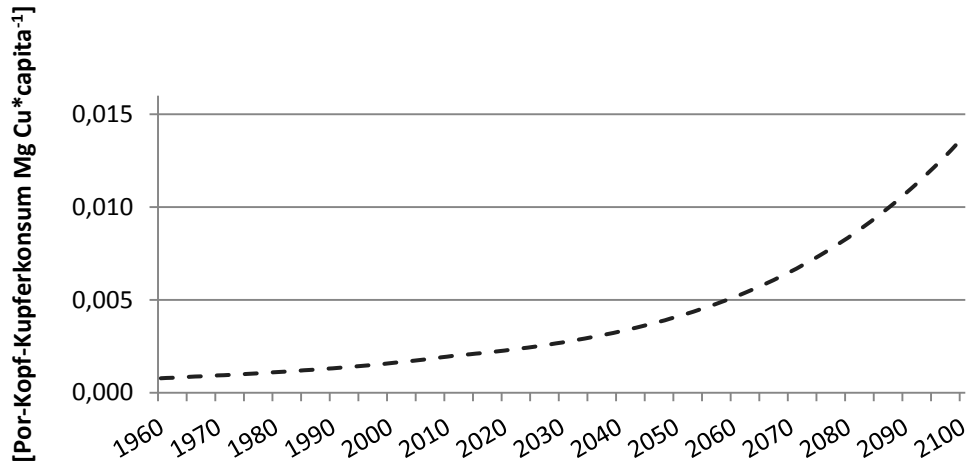


Abbildung 3-24: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebots im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario *Pluralismus*

Die globale Kupfernachfrage fällt durch die Annahme des niedrigeren Bevölkerungswachstums etwas moderater aus. 2050 liegt die Pro-Kopf-Nachfrage von Kupfer bei etwa 4 kg (Abbildung 3-25). Bis 2100 steigt diese auf über 13 kg. Die gesamte Nachfragemenge beläuft sich auf 92 Mio. Mg Cu, die jedoch aufgrund der begrenzten geogenen Reserven nicht gedeckt werden kann, so dass ein Defizit entstehen wird.



**Abbildung 3-25: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [Mg Cu*capita⁻¹]
im Szenario *Pluralismus***

Bis 2015 werden etwa 48 % des Kupfers aus *Elektromotoren* rezykliert. Knapp 60 % des verwendeten Kupfers in *Elektromotoren* wird ab 2015 nicht wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Dieser Trend spiegelt sich auch in Abbildung 3-26 wider. Zum Ende der Modellierung stammen rund 14 % aus *Elektromotoren*. Für den *Automobilsektor* liegen ähnliche Werte vor. Hier sind die Wiederverwendungsraten jeweils um 7 % höher und auch die Kupferanteile liegen im *Automobilsektor* etwas höher. Durch die durchschnittliche Produktlebensdauer von 11 Jahren ist das darin verwendete Kupfer allerdings im Mittel länger im Verkehr, so dass beide Anwendungen in ähnlichen Teilen in der *Stillen Reserve* lagern. Mengenmäßig lagern im Jahr 2100 rund 114 Mio. Mg Cu in anthropogenen Lagern.

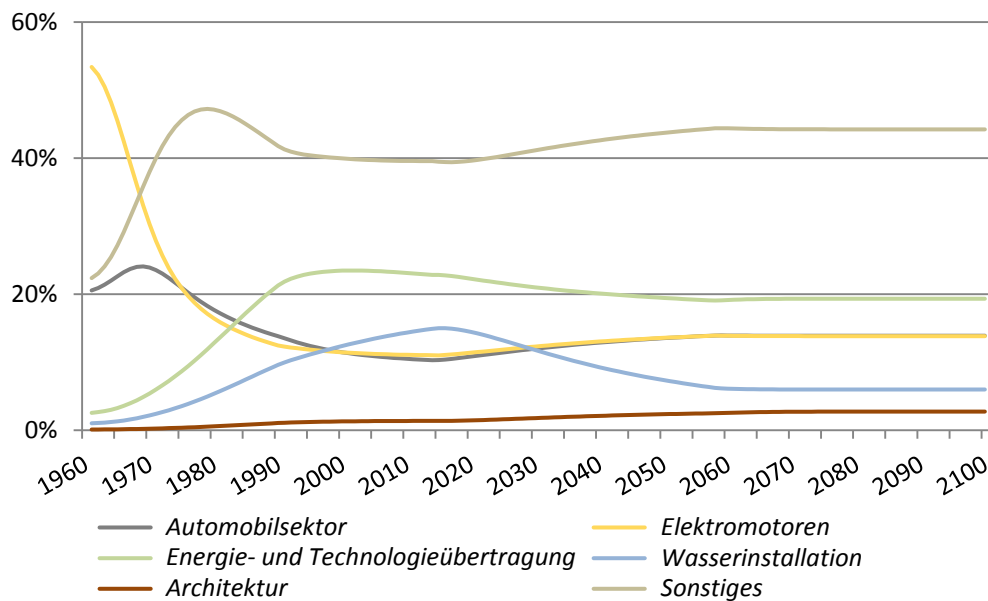


Abbildung 3-26: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der Stillen Reserve im Szenario Globale Nachhaltigkeit

Sonstiges macht Ende der 1970er Jahre fast die Hälfte der *Stillen Reserve* aus. Grund dafür ist, dass etwa ein Viertel aller Kupferanwendungen aus diesem Segment stammen und die durchschnittliche Lebensdauer 20 Jahre beträgt. In den Folgejahren nimmt der Anteil an *Energie- und Technologieübertragung* zu, welche eine durchschnittliche Anwendungsdauer von 70 Jahren aufweist und mit 38 % die Hauptanwendung von Kupfer darstellt. Ab Mitte des 21. Jahrhunderts fällt ein Fünftel der *Stillen Reserve* in diese Kategorie. *Sonstiges* bleibt dennoch der Hauptvertreter mit rund 44 %. Aktuell lagern demnach 72 Mio. Mg Cu der Anwendung *Sonstiges* in anthropogenen Lagern. Bis zum Ende der geogenen Reserven 2057 könnte dieser Bestand auf 331 Mio. Mg Cu angewachsen sein. Durch die unterschiedlichen Ausfallzeiten wächst dieses Lager bis 2100 um weitere 32 Mio. Mg Cu an. Die *Architektur* hingegen fällt mit lediglich 50 Mio. Mg Cu weniger ins Gewicht. Da im Szenario *Globale Nachhaltigkeit* ein moderater Anstieg an den Anteilen der Kupferanwendungen von 5 % angenommen wird, steigt bis 2100 auch der Anteil der *Stillen Reserve*. Rund die Hälfte des Kupfers aus diesem Bereich wird rezykliert. Insgesamt lagern bis zum Modellierungsende rund 821 Mio. Mg Cu in anthropogenen nicht genutzten Lagern.

3.6 Szenario *Balance*

Im Szenario *Balance* sind die Verteilungen der sechs Kupferapplikationen relativ ausgeglichen (Abbildung 3-27). Dies wird bei der Betrachtung der Sammelquoten ab 2015 von jeweils 75 % ebenso deutlich (Abbildung 3-3 und Tabelle 3-9).

Die Produktlebensdauer von *PKW* und *stationären Elektromotoren* beträgt im Schnitt 13 Jahre (Tabelle 3-9). Die Nutzungsdauer von *Sonstiges* wird auf 8 Jahre beziffert. Produkte der *Energie- und Technologieübertragung* gehen nach ca. 55 Jahren aus der Nutzung. Bei *Wasserinstallation* und *Architektur* werden Gebrauchszeiten von etwa 100 Jahren angenommen.

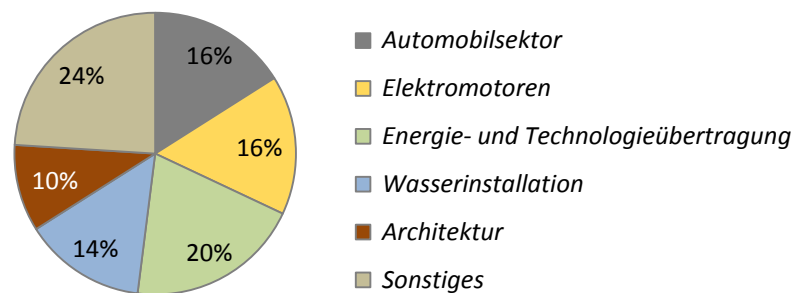


Abbildung 3-27: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios *Balance*

Die BIP-Wachstumsraten sind mit einem Mittelwert von 1,88 % global betrachtet ausgeglichen. Als UN-Variante des Bevölkerungswachstums wird wie schon beim Szenario *Baserun* und *Globale Nachhaltigkeit* (Abbildung 3-5) die *mittlere* Möglichkeit gewählt. 2050 bewohnen demnach rund 9,3 Mrd. Menschen die Erde, 2100 etwa 10,8 Mrd. Menschen.

Tabelle 3-9: Übersicht der variierten Parameterwerte im Szenario *Balance*

Produktlebenszyklus [Jahre]	<i>Automobilsektor</i>	13
	<i>Elektromotoren</i>	13
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	55
	<i>Wasserinstallation</i>	100
	<i>Architektur</i>	100
	<i>Sonstiges</i>	8
Sammelquote ab 2015 [%]	<i>Automobilsektor</i>	75
	<i>Elektromotoren</i>	75
	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>	75
	<i>Wasserinstallation</i>	75
	<i>Architektur</i>	75
	<i>Sonstiges</i>	75
BIP Wachstumsrate ab 2011 [%]	<i>wenig entwickelt</i>	1,88
	<i>sich entwickelnd</i>	1,88
	<i>entwickelt</i>	1,88
Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> [%]		2,5

Bei diesem Szenario wird die Nutzung der *Stillen Reserve* ab 2068 mit 2,5 % angenommen. Bis zu diesem Zeitpunkt kann durch die Sammlung von drei von vier Kupferanwendungen und längere Produktlebenszyklen die globale Kupfernachfrage geogen und durch Recycling gedeckt werden. Bei Betrachtung der Aufteilung des Sekundärkupfers nach Kupferanwendungen (Abbildung 3-28) fällt auf, dass ab 2050 die einzelnen Kategorien relativ gleichmäßig vertreten sind. Die Variierung ist durch die unterschiedlichen Anteile der Kupferanwendungen zu erklären.

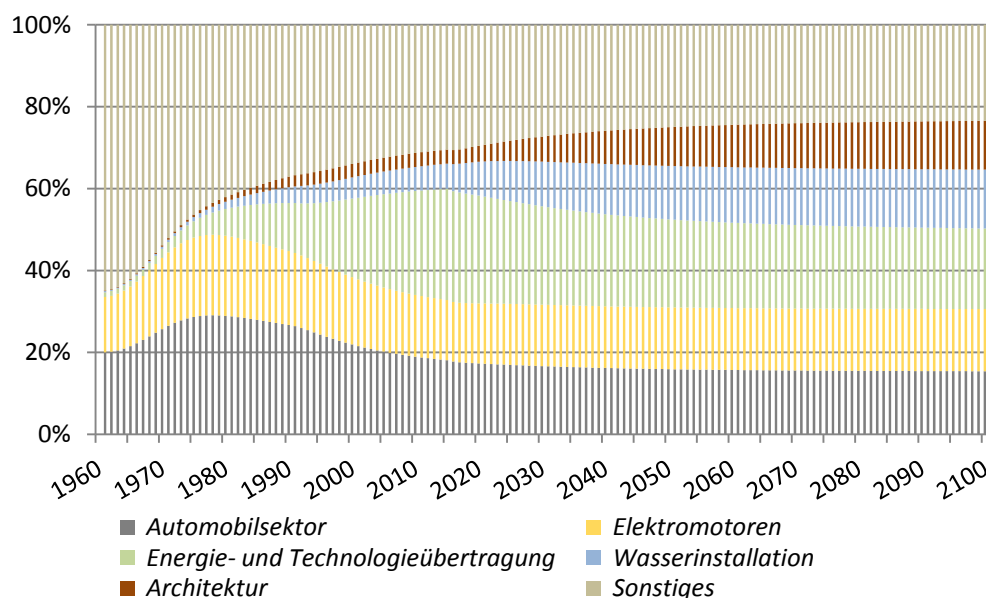


Abbildung 3-28: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario Balance

Zu Modellierungsbeginn macht *Sonstiges* mit rund 65 % den Hauptteil aus. Die durchschnittliche Produktlebensdauer liegt bei lediglich 8 Jahren und ist somit die kürzeste in allen Szenarien für diese Kategorie. Der prozentuale Anteil an den Kupferanwendungen ist von 1960 bis 1990 und ab 2015 knapp ein Viertel. Der Anteil am Sekundärkupfer liegt 2013 für *Sonstiges* bei rund 31 %. Dies reduziert sich bis zum Modellierungsende auf etwa 23 %. Ein Zehntel aller Kupferanwendungen entfällt nach 2015 auf *Architektur*; aufgrund der langen durchschnittlichen Lebensdauer von 100 Jahren liegt der Anteil am Sekundärkupferschrott erst ab 2050 bei rund 10 %. 2100 sind es 12 % des Kupferschrotts, der aus der *Architektur* stammt. Bei *Wasserinstallation* verhält es sich ähnlich. Der Anteil an den Kupferanwendungen ist allerdings mit 13 bis 14 % über den kompletten Modellierungszeitraum relativ konstant. Die Lebensdauer liegt ebenfalls bei 100 Jahren. Dadurch, dass zu Modellierungsbeginn schon anteilig mehr Kupfer in *Wasserinstallation* verbaut wird, ist der Anteil am Sekundärkupferschrott ebenfalls höher. Bereits ab 2024 sind rund 10 % des Sekundärkupfers aus dieser Anwendung; in der restlichen Phase steigt dies auf über 14 %.

Die Kupfermenge der *Energie- und Technologieübertragung* sinkt im Zeitverlauf von 38 % auf 20 % nach 2015. Diese Minimierung wird auch in Abbildung 3-28 ersichtlich. Die angenommene Produktlebensdauer liegt bei 55 Jahren. In den Jahren um 2015 stammen um die 27 % des Sekundärkupfers aus der *Energie- und Technologieübertragung*. Danach geht dieser Trend wieder auf unter 20 % zurück.

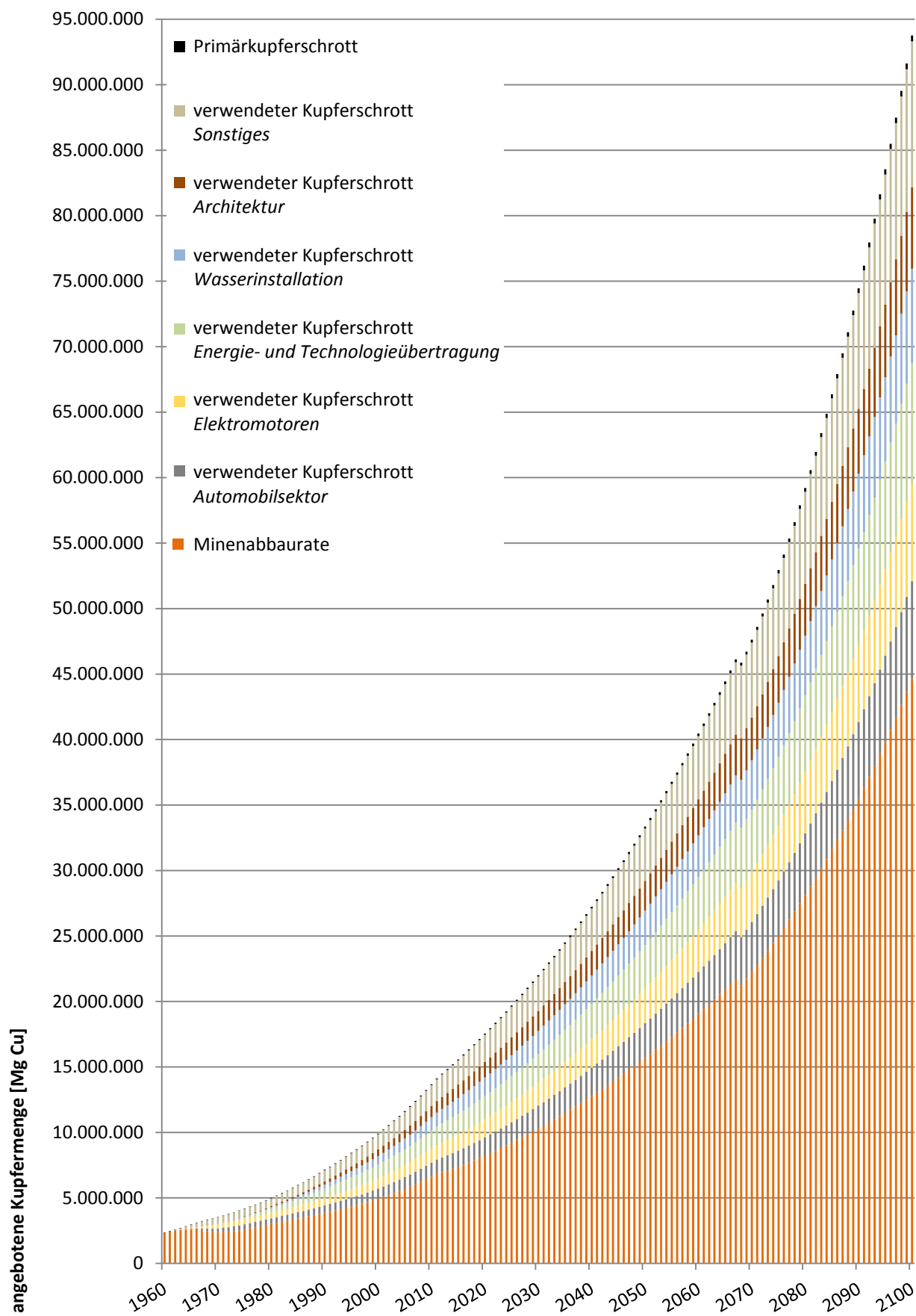


Abbildung 3-29: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario *Balance*

Automobilsektor und *Elektromotoren* haben einen mittleren Lebenszyklus von 13 Jahren. Jeweils 12 % nach 1990 bzw. 16 % nach 2015 der Kupferanwendungen stammen aus diesen beiden Segmenten. Daher ist der Kurvenverlauf beider Applikationen ähnlich. Da ab 1960 der *Automobilsektor* etwas stärker bei der Produktion vertreten ist, wirkt sich dies auch bei der Menge an Sekundärkupfer aus. 1990 stammen rund 27 % bzw. 400.000 Mg Cu des Schrottes aus diesem Segment. Bis 2050 reduziert sich der Anteil auf 16 % bzw. 2,6 Mio. Mg Cu. Da in diesem Jahr aus Primär- und Sekundärkupfer insgesamt rund 32 Mio. Mg Cu dem Markt zur Verfügung stehen, kann die globale Nachfrage gedeckt werden (Abbildung 3-29). Dies ändert sich rund 18 Jahre später. Ab diesem Zeitpunkt kann die Nachfrage durch die Erschöpfung der geogenen primären Reserven nicht mehr gedeckt werden, so dass der Abbau anthropogener Lager wie Deponien erfolgt.

Im Szenario *Balance* erfolgt weltweit ein konstantes Wirtschaftswachstum von 1,88 %, was einem durchschnittlichen Wachstum der vergangenen 50 Jahre entspricht. Die Nachfrage nach Kupfer würde durch diese Annahme nur moderat auf 3,5 kg Cu*capita⁻¹ im Jahr 2050 bzw. 7,6 kg Cu*capita⁻¹ in 2100 anwachsen (Abbildung 3-30). Bei diesem Szenario wird ein mittleres Bevölkerungswachstum angenommen. Die globale Gesamtnachfrage liegt 2100 demnach bei rund 82 Mio. Mg Cu. Dies kann durch den Abbau der *Stillen Reserve* und das Rückführen des Sekundärkupfers in den Stoffkreislauf gedeckt werden (Abbildung 3-29).

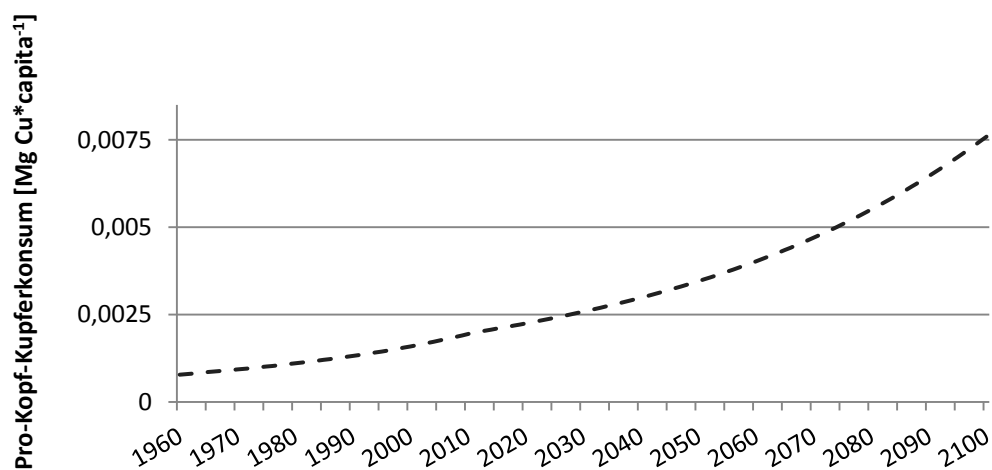


Abbildung 3-30: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [Mg Cu*capita⁻¹] im Szenario *Balance*

Zu Beginn ist der Anteil an ausrangiertem und nicht rezykliertem Kupfer aus *Sonstiges* mit knapp 80 % der größte Teil (Abbildung 3-31). An zweiter und dritter Stelle folgen mit jeweils knapp 10 % der *Automobilsektor* und *Elektromotoren*. Der zeitliche Verlauf zeigt, dass sich dieses Verhältnis stark verändert und die einzelnen Kupferanwendungen in der *Stillen Reserve* ausbalanciert sind und zwischen 6 % und 27 % liegen. Dabei spielt Kupfer aus *Sonstiges* die bedeutendste Rolle, da rund ein Viertel aller verwendeten Kupferprodukte auf diese Kategorie entfallen. Ab 2068 findet ein Abbau der *Stillen Reserve* statt.

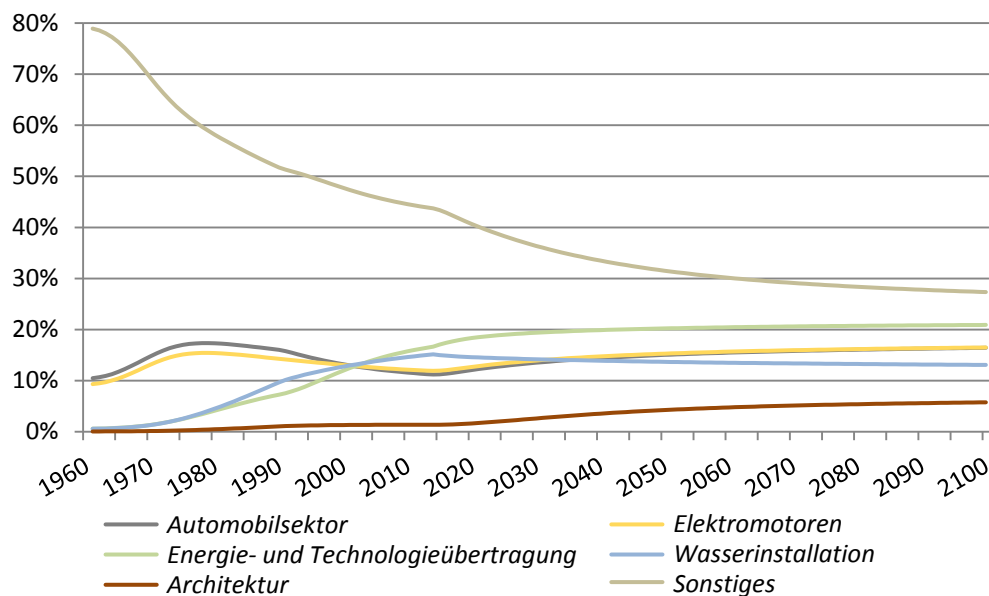


Abbildung 3-31: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der *Stille Reserve* im Szenario *Balance*

Die Wiederverwendungsraten vom *Automobilsektor* und *Energie- und Technologieübertragung* sinken ab 2015 leicht von 55 % auf 51 %. Dementsprechend fließen diese minimal mehr in die *Stille Reserve* ein. Bei allen anderen vier Kategorien erhöhen sich die Wiederverwendungsraten deutlich. Besonders stark erfolgt dies bei *Wasserinstallation* und *Sonstiges*. Vor 2015 wurden rund 77 % der *Wasserinstallation* bzw. zwei Drittel von *Sonstiges* nicht wiederverwendet und lagern als *Stille Reserve*. Nach 2015 minimiert sich diese Quote. 43 % der *Wasserinstallation* und knapp die Hälfte von *Sonstiges* finden direkte Wiederverwendung. Da allerdings ab 2068 aufgrund der starken Nachfrage und der Erschöpfung der geogenen primären Reserven ein Abbau der *Stille Reserve* stattfindet, werden diese Kupferbestände dem Kreislauf nach Lagerung wieder zugeführt. In der Modellierung wurde, wie schon im Szenario *Globale Nachhaltigkeit* erwähnt, keine Berücksichtigung der Abbauwürdigkeit einzelner Produktanwendungen vorgenommen. Daher erfolgt keine Differenzierung der abgebauten *Stille Reserve* nach Kategorien, sondern ein konstanter Abbau wird angenommen.

*"It is not knowledge, but the act of learning,
not possession but the act of getting there,
which grants the greatest enjoyment."*

[Forrester 1962]

4 Diskussion

Die Literaturrecherche anthropogener Stoffkreisläufe von Kupfer hat ergeben, dass eine statische Modellierung keine adäquaten Ergebnisse liefert [Chen und Graedel 2012a]. Dennoch ist derzeit für das globale Rohstoffsystem Kupfer bisher kein dynamisches Modell veröffentlicht worden (Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2). Statische Modelle beziehen sich meist auf den Zeitraum eines Jahres. Da Kupfer ein Rohstoff ist, der ein sehr breites Anwendungsfeld mit unterschiedlichen Lebenszyklen meist von mehreren Jahrzehnten hat, ist die Betrachtung von nur einem Jahr unzureichend und wenig aussagekräftig.

Tabelle 4-1: Übersicht über die Anzahl von dynamischen und statischen Modellen des Rohstoffsystems Kupfer, kategorisiert nach globaler oder regionaler Betrachtungsebene [Chen und Graedel 2012a]

	Dynamisch	Statisch
Global	0	3
Kontinental	2	9
USA	1	2
Europa	3	15
Japan	2	5
China	1	4
Afrika	0	11
andere asiatische Länder	2	12
CIS und Mittlerer Osten	0	9
andere amerikanische Staaten	0	9
Ozeanien	0	3
Stadt	1	0
Flusseinzugsgebiet	0	1

Eine globale Betrachtungsebene ist für ein umfassendes Verständnis des Rohstoffsystems Kupfers notwendig. Veröffentlichungen der *International Copper Study Group* zeigen, dass der Kupferabbau zwar auf wenige Länder lokalisiert ist, dagegen andere Staaten die Raffination und Produktion vornehmen [ICSG 2012]. Das raffinierte Kupfer wird an den internationalen Börsen in London, New York oder Shanghai gehandelt und weltweit zu verschiedenen Produkten verarbeitet. Es ist mengenmäßig das am dritt häufigsten verwendete Metall der Erde. Eine globale Untersuchung soll das Rohstoffsystem Kupfer adäquat abbilden, aber dennoch vereinfacht darstellen. Van Vuuren *et al.* unterstützt diese umfassende, aber simplifizierte Vorgehensweise und entwickelte ein Rohstoffmodell für metallische Massenrohstoffe. In diesem wird allerdings keine Aufschlüsselung der einzelnen Metalle vorgenommen, sondern lediglich zwischen Stahl und anderen Basismetallen unterschieden [van Vuuren *et al.* 2002].

Tabelle 4-2: Übersicht über anthropogene Kupferkreisläufe, kategorisiert nach Betrachtungsebene, Zeitraum und statischer bzw. dynamischer Modellierung (in Anlehnung an Chen und Graedel 2012a)

	Systemgrenze	Betrachtungs- zeitraum	Statisch oder Dynamisch	Referenz
Global	Welt	1994	statisch	[Graedel <i>et al.</i> 2004]
	Welt	Mitte 1990er	statisch	[Rauch und Graedel 2007]
	Welt	2000	statisch	[Rauch und Pacyna 2009]
Länder	Länderspezifisch	1994	statisch	[Graedel <i>et al.</i> 2004]
	Nordamerika	1900-1999	dynamisch	[Spatari <i>et al.</i> 2005]
	Westeuropa	1945-1999	dynamisch	[Ruhrberg 2006]
	USA	2004	statisch	[Goonan 2010]
	USA	1900-2100	dynamisch	[Zeltner <i>et al.</i> 1999]
	Deutschland	1999	statisch	[Scharp und Erdmann 2006]
	Dänemark	1994	statisch	[Hansen <i>et al.</i> 2000]
	Niederlande	1990	statisch	[Voet <i>et al.</i> 2000]
	Schweiz	1900-2000	dynamisch	[Wittmer <i>et al.</i> 2007]
	Österreichisches Reich	1915-1918	dynamisch	[Klinglmair und Fellner 2010]
	Schweiz	1840-2060	dynamisch	[Bader <i>et al.</i> 2010]
	Japan	2005	dynamisch	[Tatsumi <i>et al.</i> 2008]
	Japan	1950-2005	dynamisch	[Daigo <i>et al.</i> 2009]
	China	2004	statisch	[Guo und Song 2008]
Stadt	Stockholm	1990-1995, 1995	dynamisch	[Bergbäck <i>et al.</i> 2001; Sörme <i>et al.</i> 2001a; Svidén und Jonsson 2001; Sörme <i>et al.</i> 2001b]
Fluss- einzugs- gebiet	Seine	1994-2003	statisch	[Thévenot <i>et al.</i> 2007]

Auf kontinentaler Ebene wurde das System Kupfer bereits dynamisch modelliert [Spatari *et al.* 2005; Spatari *et al.* 2002]. Auch auf Länderebene wurde das System Kupfer bereits abgebildet und modelliert (Tabelle 4-2).

Generell wird deutlich, dass deutlich mehr statische als dynamische Modelle generiert wurden. Es gibt einen erheblichen Bedarf, ein dynamisches Modell zu entwickeln, welches die anthropogenen Stoffkreisläufe von Kupfer abbildet. Das Modell SysCu realisiert dies.

Im folgenden Unterkapitel werden die verwendete Methodik *System Dynamics* und ihre Eignung zur Modellierung von Rohstoffsystemen beleuchtet. Einerseits werden die an die Methodik gestellten Charakteristika erläutert, andererseits mit bereits durchgeführten Studien verglichen, die sich mit anthropogenen Stoffkreisläufen beschäftigen.

Anschließend werden die erhobenen Modellergebnisse mit Ergebnissen anderer Untersuchungen verglichen und erörtert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Modellzwecke ein Vergleich der verschiedenen Studienresultate nur schwer möglich ist [Tong und Lifset 2007]. Dennoch sollen die unterschiedlichen Herangehensweisen und Annahmen der verschiedenen Modelle im Vergleich mit dem Modell SysCu diskutiert werden und eine Einordnung der Ergebnisse erfolgen. Ein weiterer Fokus ist die Betrachtung der dynamischen Reichweite von Kupfer zur Abschätzung und Einordnung der Knappheit des Rohstoffs Kupfer.

Im letzten Abschnitt wird das Potenzial von *Urban Mining* zur Rohstoffsicherung fokussiert. Hierbei werden mögliche Trends aufgezeigt. Anschließend erfolgt eine kurze Abschätzung der Rentabilität bzw. eine Potenzialabschätzung.

4.1 *System Dynamics* zur Modellierung von Rohstoffsystemen

Der wie bei SysCu angewendete systemtheoretische Ansatz fokussiert das Erkennen von Zusammenhängen zwischen vielfältigen Ursache-/Wirkungsbeziehungen und eignet sich daher besonders für das Erfassen komplexer Vorgänge [Milling 1974]. Ziel des Modellierens dynamischer Systeme ist, das Verhalten und die Gründe für dieses Verhalten zu verstehen und zu erklären [Bossel 2004]. *System Dynamics* eignet sich besonders zur Behandlung von komplexen und interdisziplinären Fragestellungen, da das System gezielt als Ganzes betrachtet wird [Schade 2005].

Besondere Vorteile der *System Dynamics*-Methode sind die systematische Strukturierung des zu untersuchenden Systems, die Transparenz bezüglich existierender Zusammenhänge und Abhängigkeiten sowie die Analyse von Prozessen [Hillenbrand 2009]. Bei *System Dynamics*-Modellen besitzen Klarheit und Verständlichkeit ein großes Gewicht [Meadows 1980]. Die Modellierung soll dabei möglichst einfach gehalten werden. Einerseits soll das Modell die Wirklichkeit möglichst genau darstellen, andererseits das Verständnis des Systems und das Wirkungsgefüge nicht durch eine zu große Detailgenauigkeit in Frage stellen. Diese Problematik der beiden widerstrebenden Ziele wird auch als Bonini-Paradoxon bezeichnet [Vennix 1996]. Das systemische Denken sollte jedoch stets im Vordergrund stehen [Olaya 2012; Sterman 2002].

Aufgrund von Rückkopplungen können Zeitverzögerungen systemdynamisch dargestellt werden, so dass eine Betrachtung über einen längeren Zeitraum möglich ist und komplexe Probleme über mehrere Perioden analysiert werden können. Eine rein mathematisch-statistische Betrachtung findet bei *System Dynamics* selten intensiv statt [Meadows 1980], da bei einer Systembetrachtung das generelle Verständnis im Vordergrund steht und nicht eine detaillierte und präzise Darstellung. Es erfolgt eine vereinfachte Annahme quantitativer und qualitativer Zusammenhänge. Durch die Elimination nicht-relevanter Details wird ein schnelleres und einfacheres Systemverständnis erlangt [Sterman 2000].

Da meist nicht-lineare Feedback-Strukturen in *System Dynamics*-Modellen existieren, sind einige statistische Techniken nicht anwendbar bzw. extrem diffizil. Der Modelloutput dient somit nicht für quantitative Prognosen spezieller Variablen in einzelnen Jahren, sondern vielmehr für qualitative Verhaltenseigenschaften, um mögliche Einflussfaktoren herauszustellen und mögliche Trends zu erkennen [Wolstenholme 1990]. Das *System Dynamics*-Paradigma behandelt das Problem der Modellvalidität qualitativ und informell. Es gibt keinen quantitativen Index, welcher die Validität zusammenfasst. Um Scheingenauigkeiten sowie Scheinzusammenhänge zu umgehen und das Systemverständnis zu überprüfen, werden verschiedene Validitätstests und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die Validierung findet während des Modellherstellungsprozesses statt [Forrester 1972]. Besonders der Modellzweck spielt eine entscheidende Rolle bei der Aussage der Modellgüte [Bossel 2004; Sterman 2000]. Da Simulationsmodelle stets eine starke Vereinfachung der Realität sind, können sie dieser nur angenähert werden [Wolstenholme 1999]. Da häufig eine quantitative Datenbasis nicht vorhanden ist, werden für relevante Modellgrößen Modellannahmen getroffen. Dennoch sieht Sterman die Notwendigkeit, trotz Unsicherheiten den Effekt dieser Variablen für das Systemverständnis zu berücksichtigen, da sonst ein Begreifen der Systeminteraktionen nicht erfolgen kann [Sterman 2000]. Eine besondere Herausforderung bei der Modellierung stellt die Implementierung qualitativer Größen (z. B. Kaufentscheidungen, Entscheidungen von Produzenten) dar, die jedoch meist unabdingbar sind [Luna-Reyes und Andersen 2003].

Visualisierte Wirkungsgraphen (CLDs) dienen der Verdeutlichung kausaler Zusammenhänge von miteinander verknüpften Variablen. Mit ihrer Hilfe sollen komplexe Strukturen vereinfacht dargestellt werden [Wolstenholme 1990].

Unter Berücksichtigung der damit verbundenen Unsicherheiten besteht der Modellierungszweck nicht in der exakten Prognose des globalen Kupferkonsums bzw. Kupferangebotes und der Nachbildung historischer Verläufe. Das Modellverständnis bezüglich der Wirkungszusammenhänge und der daraus resultierenden Dynamiken steht im Vordergrund des Modells SysCu.

Basierend auf der *System Dynamics*-Methodik ermöglicht das Modell SysCu die Darstellung von direkten und indirekten Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Parametern mithilfe kurz-, mittel- und langfristiger Rückkopplungskreise. Hinsichtlich eines Rohstoffsystems stellen die Rückkopplungsschleifen essentielle Elemente wie Nachfrage, Angebot, Produktlebenszyklen, Recyclingquoten etc. dar. Die bedeutendsten dynamischen Entwicklungen können mithilfe dieser Schleifen simuliert und analysiert werden.

4.2 Modellanalyse und Vergleich der Szenarien

Bei Betrachtung der globalen Kupfernachfrage wurde in SysCu die Annahme der Metallnutzungsintensität getroffen. Demnach steigt mit wachsendem BIP auch die globale Nachfrage nach einem Rohstoff [Malenbaum 1978; Cleveland und Ruth 1998]. Der Kurvenverlauf wird durch eine inverse U-Kurve beschrieben. Roberts konnte zeigen, dass trotz geringer Datenlage auf globaler Betrachtungsebene eine Fokussierung auf die gesamte Ökonomie zu guten Resultaten bezüglich des Metallgebrauchs führt [Roberts 1996]. Auch Ayres *et al.* und Kapur verwenden die Theorie der Metallnutzungsintensität zur Abbildung der globalen Nachfrage [Ayres *et al.* 2002; Kapur 2006]. Andere Studien, die sich mit metallischen Rohstoffsystemen und *System Dynamics* beschäftigen, implementierten diese ebenfalls [van Vuuren *et al.* 1999; Tilton 1990b; Gordon *et al.* 2006]. Van Vuuren *et al.* gehen davon aus, dass, wenn die sich entwickelnden Länder dem vergangenen Trend der Industriestaaten hinsichtlich der steigenden Metallnutzungsintensität folgen, in den kommenden Jahrzehnten eine Steigerung der weltweiten Metallnachfrage um den Faktor 2 bis 4 stattfinden könnte [van Vuuren *et al.* 2002]. Kapur geht noch von deutlich höheren Steigerungsraten aus [Kapur 2005]. Zeltner *et al.* geht für den Zeitraum von 1900 bis 2100 von einem Wachstum der globalen Kupfernachfrage um den Faktor 60 aus [Zeltner *et al.* 1999].

Beim Vergleich der fünf modellierten Szenarien wird deutlich, dass in den kommenden Jahren der Anstieg des globalen Kupferkonsums moderat sein wird (Abbildung 4-1). Das Szenario *Pluralismus* hat bis 2025 den geringsten Nachfragezuwachs, gefolgt von *Balance*. Beide Szenarien sind durch ein moderates Wirtschaftswachstum gekennzeichnet. Da bei *Pluralismus* ein niedriges Bevölkerungswachstum angenommen wird, ist die nachgefragte Kupfermenge mit rund 19 Mio. Mg Cu am geringsten. *Baserun* und *Globale Nachhaltigkeit* liegen mit etwa 2 Mio. Mg Cu über den Kupfermengen der vorher genannten Szenarien. Lediglich *Hohes Wachstum* sieht mit über 27 Mio. Mg Cu fast eine Verdopplung des heutigen Kupferkonsums vor. Die Studie des RWI Essen *et al.* geht von noch einem etwas höheren Wert von 28 Mio. Mg Cu aus [RWI Essen *et al.* 2006]. Es zeigt sich, dass die zugrunde gelegte Metallnutzungsintensitätskurve, kombiniert mit dem regionalen Wirtschaftswachstum und der Bevölkerungsentwicklung, zu ähnlichen Ergebnissen kommt.

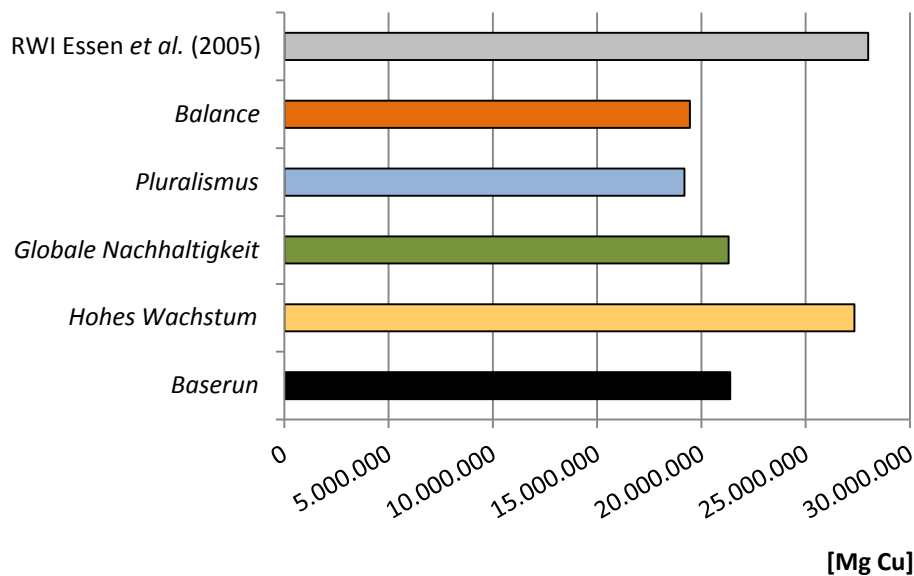


Abbildung 4-1: Vergleich der modellierten nachgefragten Kupfermengen nach Szenarien und der Studie des RWI Essen *et al.* (2005) für das Jahr 2025

Bis 2100 verstärkt sich dieser Trend deutlich. Die weltweit nachgefragte Kupfermenge schwankt je nach Szenario zwischen 82 Mio. Mg Cu in *Balance* und 213 Mio. Mg Cu bei *Hohes Wachstum*. *Pluralismus* und *Baserun* liegen demnach bei 93 Mio. Mg Cu bzw. 147 Mio. Mg Cu. In der Untersuchung von Kapur zu anthropogenen Kupfervorkommen wird eine weltweite Kupfernachfrage von 30 bis 135 Mio. Mg Cu in 2100 angenommen [Kapur 2006]. Er nimmt in einem seiner Szenarien ab 2050 einen Rückgang des Kupferverbrauchs von 50 auf 30 Mio. Mg Cu an.

Bei der Berechnung des Pro-Kopf-Konsums gehen Spatari *et al.* von einer zukünftigen Kupfermenge von $7,9 \text{ kg Cu} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ aus [Spatari *et al.* 2005]. Tilton und Lagos gehen von durchschnittlich 11 kg Cu in den kommenden Jahren aus [Tilton und Lagos 2007]. Diese Werte zeigen, dass die Modellannahmen von SysCu mit anderen Veröffentlichungen vergleichbar sind (Abbildung 4-2). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass in den oben genannten Studien der Modellzweck nicht mit dem von SysCu übereinstimmt. Spatari *et al.* befasst sich mit dem Pro-Kopf-Konsum speziell von Nordamerika [Spatari *et al.* 2005]. Tilton und Lagos erörtern in ihrer Studie das Paradigma des fixen Lagerbestandes von Kupferreserven [Tilton und Lagos 2007] und beziehen sich hierbei auf eine Veröffentlichung von Gordon *et al.* [Gordon *et al.* 2006]. Tilton und Lagos gehen davon aus, dass sich aufgrund von Preisentwicklungen, Explorationen und technologischem Fortschritt der Kupferbestand variabel verändert und somit den Pro-Kopf-Verbrauch maßgeblich beeinflusst. Ziel ist hierbei keine Modellierung des Kupfersystems, sondern eher das Darlegen einer differenzierteren Betrachtungsebene auf das globale Rohstoffsystem.

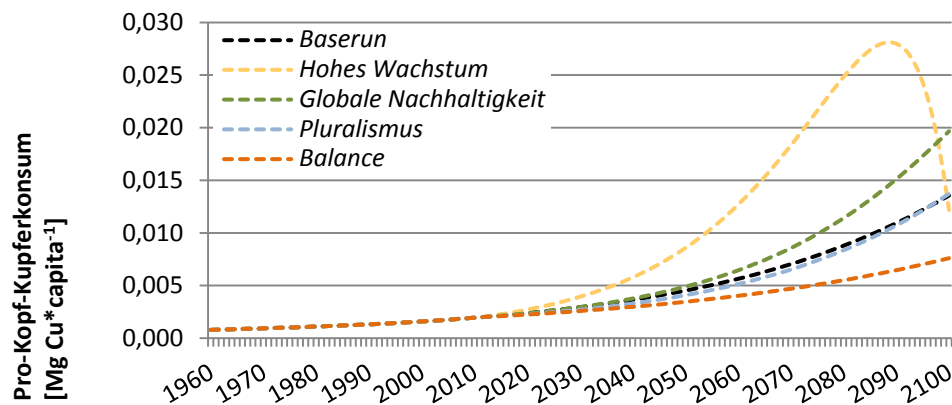


Abbildung 4-2: Vergleich der Entwicklung des Pro-Kopf-Kupferkonsums [Mg Cu*capita⁻¹] der fünf Szenarien

Das System Kupfer wird durch seine inhomogenen Lagerbestände charakterisiert [Graedel *et al.* 2002]. Da mehr Kupfer in den Stoffkreislauf gelangt als ausrangiert wird, ist die Rede von einem sich in Gebrauch befindlichen Kupferlagers. Dieses Verständnis wird durch das *System Dynamics*-Modell SysCu berücksichtigt (Lagerbestand - *copper in use*). Da Kupfer in sehr vielen Produkten Anwendung findet und sich daher ubiquitär im Alltag und in der Umwelt befindet, wird zur Modellierung auf die Kategorisierung von sechs Kupferanwendungen nach Angerer *et al.* zurückgegriffen [Angerer *et al.* 2010]. Statistiken und empirische Daten mit einer genauen Betrachtung, vor allem im globalen Maßstab, sind nicht existent [Graedel *et al.* 2002]. Daher werden vereinfachte stellvertretende Indikatoren wie die hier getroffenen sechs Kupferanwendungen und ihre Anteile am gesamten produzierten und raffinierten Kupfer verwendet.

Kapur bildet in seiner Studie vier Kategorien für Kupferanwendungen (Elektrische Geräte und Elektrogeräte, Gebäude und Konstruktion, Infrastruktur und Transport) [Kapur 2006]. Daneben findet, basierend auf den IPCC-Berichten, eine auf vier Regionen kategorisierte Weltbetrachtung statt [Intergovernmental Panel on Climate Change 2013]. Hiernach wird zwischen OECD90 (alle Länder, die 1990 der OECD angehörten), ASIA (alle sich entwickelnde Länder Asiens), REF (alle osteuropäischen Länder und ehemalige Staaten der Sowjetunion) und ALM (restliche sich entwickelnde Länder in Afrika, Lateinamerika und Mittlerer Osten) unterschieden. Ayres *et al.* verwendet ebenfalls diese regionale Kategorisierung [Ayres *et al.* 2002]. Eine solche Kategorisierung wird im Modell SysCu nicht verwendet, da Kupfer auf dem weltweiten Rohstoffmarkt gehandelt, produziert und konsumiert wird. Da die Datenlage zu den einzelnen Prozessschritten mit großen Unsicherheiten behaftet ist, stützt sich das Modell SysCu auf eine globale nicht weiter untergliederte Betrachtungsweise. Hiermit wurde der Anspruch des entwickelten Modells, das Rohstoffsystem Kupfer möglichst einfach darzustellen und damit eine Anwendungserweiterung auf andere Rohstoffe umsetzen zu können, erreicht. Als Modellzweck galt es, ein Systemverständnis zu generieren und Trends aufzuzeigen.

In der Studie von Graedel *et al.* steht die anthropogene Mobilisierung und die Verwendung von Kupfer im Fokus [Graedel *et al.* 2002]. Hierbei findet eine detaillierte Betrachtung der primären Kupferproduktion (Minenabbau, Schmelzen und Raffination) statt. Die Betrachtungsebene ist regional und beschränkt sich auf Europa. Daher werden sowohl Importe als auch Exporte mit in das Modell integriert. Bei der Verwendung von Kupferprodukten findet eine detailliertere Aufschlüsselung in neun Kategorien von Kupferfertigungen und vier Metalllegierungen statt. Die Kupferanwendungen (Kupferprodukte und Legierungsprodukte) werden in einem gesonderten Teilmodell komprimiert betrachtet. Hierbei findet allerdings lediglich eine Gruppierung in die vier Segmente *Gebäude*,

Maschinen, Fahrzeuge und Infrastruktur statt [Graedel *et al.* 2002]. Aufgrund der regionalen europäischen Betrachtungsebene ist die Datenbasis valider. Für die einzelnen Prozessschritte liegen jeweils genaue Zahlen vor, die in dem Modell berücksichtigt werden können. Ziel ist bei der Modellierung die Abbildung des primären Kupferkreislaufes in Europa. Durch die gröbere Kategorisierung auf lediglich vier Segmente können zeitliche Verzögerungen aufgrund unterschiedlicher Nutzungsdauern weniger berücksichtigt werden. Dadurch, dass das Rohstoffsystem Kupfer allerdings weltweit miteinander verknüpft ist, kann dies bei einer regionalen Modellierung nicht ausreichend Beachtung finden.

Andere Rohstoffmodelle wählen bei einer globalen Betrachtung keine detailliertere Aufschlüsselung nach Produktkategorien [van Vuuren *et al.* 1999; Van Vuuren und De Vries 2000]. Zum Teil wird sogar auf eine prinzipielle Produktkategorisierung verzichtet [Van Vuuren *et al.* 2010].

In der teilweise empirischen Studie von Wittmer *et al.* zu den anthropogenen Kupferbeständen in der Schweiz erfolgt eine Kategorisierung in drei Anwendungsbereiche plus Deponie [Wittmer *et al.* 2007; Wittmer 2006]. Der Pro-Kopf-Verbrauch an Kupfer liegt bei $269 \pm 31 \text{ kg} \cdot \text{capita}^{-1}$. Nach diesen Berechnungen befindet sich knapp ein Fünftel der urbanen Schweizer Kupferlagerstätten auf Deponien. Der von Wittmer *et al.* erhobene Pro-Kopf-Verbrauch von Kupfer ist im Vergleich zu anderen Veröffentlichungen recht hoch. Gordon *et al.* beziffert den nordamerikanischen Kupferbestand auf $170 \text{ kg} \cdot \text{capita}^{-1}$ [Gordon *et al.* 2006]. Der globale durchschnittliche Kupferbestand liegt zwischen 35 und 55 $\text{kg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$ [Gerst 2009; Gerst und Graedel 2008]. Bei Betrachtung dieser Zahlen wird deutlich, wie unsicher die Datenlage zu dem in Gebrauch befindlichen Kupfer ist und wie differenziert eine Betrachtung erfolgen muss. Eine Kategorisierung in die drei Entwicklungszustände von Ländern ist demnach unumgänglich. Der Kupferbestand in *entwickelten* Ländern liegt deutlich über dem globalen Durchschnitt. Zukünftig dürfte allerdings der Bedarf aufgrund der Marktsättigung rückläufig sein. *Kaum* bzw. *wenig entwickelte* Länder werden hingegen den Kupferbedarf erheblich steigern. Diese Entwicklung kann durch die Kategorisierung in *entwickelte*, *wenig entwickelte* und *kaum entwickelte* Länder abgebildet und berücksichtigt werden.

Bei der Datenbasis zu weltweiten Recyclingquoten, dissipativen Verlusten und Sekundärkupferflüssen gibt es ebenfalls erhebliche Variabilitäten [Graedel *et al.* 2002; IIED 2002; Gleich 2006]. Eine einheitliche und belastbare Datenerhebung existiert derzeit nicht [RWI Essen *et al.* 2006]. Die in dem Modell SysCu getroffenen Annahmen basieren daher auf Literaturwerten und können angepasst bzw. durch Szenarien variiert werden, so dass eine realistische Aussage getroffen werden kann.

Um ein möglichst umfassendes Systemverständnis zu erhalten, wird in das Modell SysCu auch der Faktor dissipative Verluste implementiert. Dissipative Verluste stehen dem Kupfersystem nicht mehr zur Verfügung und lagern ubiquitär in geringsten Konzentrationen in der Umwelt. Sie werden nicht als potenzielles Kupferlager angesehen, sondern gelten als Verlust des Stoffkreislaufes. Hinzu kommt, dass Kupfer phytotoxisch ist und eine bakterienhemmende Wirkung besitzt [Gleich 2006; RWI Essen *et al.* 2006]. Neben dem Rohstoffverlust spielen hierbei auch Auswirkungen auf die Umwelt eine wichtige Rolle, die allerdings beim Modell SysCu keine weitere Relevanz haben. Zwar sind die dissipativen Verluste am Beispiel Schweiz nach Expertenschätzung mit $0,1 \text{ kg Cu} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ als sehr gering anzusehen [von Arx 2006; Wittmer 2006], sollten aber dennoch Berücksichtigung finden [Spatari *et al.* 2005; Ayres *et al.* 2002]. Zeltner *et al.* implementiert diesen Aspekt allerdings nicht in sein Kupfermodell [Zeltner *et al.* 1999].

Bei der Betrachtung der Kupferanwendungen spielt neben der prozentualen Verteilung die sehr unterschiedliche Produktlebensdauer eine wichtige Rolle. Sie wird als wesentlicher Faktor für die

Rohstoffverfügbarkeit angesehen [BGR 2011]. In der Studie von Graedel *et al.* wird die zeitliche Variabilität des Aus-der-Nutzung-Gehens in Kombination mit der durchschnittlichen Produktlebensdauer diverser Kupferanwendungen berücksichtigt [Graedel *et al.* 2002]. Die relative Häufigkeit des Ausrangierens und somit Rohstoffpotenzials wird in der Studie durch eine nach unten geöffnete Parabel beschrieben. Bei diesem Vorgehen wird jedoch nicht berücksichtigt, dass Kupferprodukte theoretisch auch schon kurz nach der Produktion ausrangiert werden bzw. sich auch weit über die durchschnittliche Lebensdauer in Gebrauch befinden können. Dieser Aspekt wird unter anderem von Spatari *et al.* und Kapur mithilfe einer Weibull-Verteilung berücksichtigt [Spatari *et al.* 2005; Kapur 2006]. Zeltner *et al.* verwendet für die mittlere Verweildauer von Kupferprodukten eine zweiparametrische Gauss-Funktion, um zusätzlich die Dynamik zu berücksichtigen [Zeltner *et al.* 1999]. Als Vorteil der in dieser Arbeit verwendeten Weibull-Funktion wird im Gegensatz zur Normal-Verteilung die Möglichkeit gesehen, dass theoretisch alle Produkte aus der Nutzung fallen können. Eine Normalverteilung macht diese zeitliche Verzögerung und Dynamik nicht möglich [Kleijn *et al.* 2000].

Die implementierte zeitliche Verzögerung der einzelnen Produktkategorien setzt den Fokus auf den sekundären Stoffkreislauf von Kupfer und somit auf das Rückgewinnungspotenzial und die Rohstoffsicherung. Rund 35 % des Kupfers stammen aus Sekundärmaterial, das entspricht rund 9 Mio. Mg [ICA 2013]. Beim Modell SysCu setzt sich das globale Kupferangebot aus der Summe des aus primären und sekundären Quellen gewonnenen Kupfers zusammen. Van Vuuren *et al.* gehen bei der Modellierung von metallischen Rohstoffsystemen analog vor [van Vuuren *et al.* 2002].

Die im Modell SysCu berechneten Szenarien ergeben, dass im Jahr 2050 zwischen 34 und 47 Mio. Mg Cu aus primären Rohstoffquellen gewonnen werden könnten (Abbildung 4-3). Lediglich im Szenario *Hohes Wachstum* sind die geogenen Rohstoffvorkommen bereits erschöpft. Aus primären Kupferquellen wird kein Kupfer mehr gewonnen. Lediglich 5 Mio. Cu gelangen in diesem Szenario noch in den globalen Stoffkreislauf. Dieses Kupfer stammt aus den recycelten ausrangierten Kupferanwendungen in Abhängigkeit des Produktlebenszyklus. Ab 2015 ist der Anteil an *Wasserinstallation*, welches eine relativ kurze angenommene durchschnittliche Lebensdauer von 60 Jahren hat, von 14 % auf 11 % gesunken. Dies bedeutet, dass der relative Anteil dieser Kupferanwendung am sekundär gewonnen Kupfer beim Szenario *Hohes Wachstum* relativ hoch ist. Anders verhält es sich hingegen bei *Architektur*. Dieser Anteil ist minimal, was vor allem durch die geringe Sammelquote von lediglich 10 % zu erklären ist.

Beim Szenario *Globale Nachhaltigkeit* ist der Anteil der *Architektur* am sekundär zurückgeführten Kupfer im Vergleich zu den anderen Szenarien am deutlichsten. Zum einen ist die Sammelquote von *Architektur* mit 40 % höher als in den anderen Szenarien und die durchschnittliche Produktlebensdauer liegt bei 100 Jahren. Vor allem vor 2015 sind rund 4,5 % des verwendeten Kupfers in diesem Segment zu finden. Durch die lange Dauer im Nutzungszyklus wird 2050 relativ viel Kupfer aus der *Architektur* zurückgewonnen. Auch der Anteil an *Wasserinstallation* spielt eine erhebliche Rolle. Dies wird durch die kürzere Lebensdauer von durchschnittlich 50 Jahren zusätzlich verstärkt. Generell wird bei diesem Szenario die Bedeutung des Recyclings und damit einhergehend der Nachhaltigkeitsaspekt besonders deutlich. Über 40 % des Kupferangebotes stammen hier aus sekundär gewonnenem Kupfer.

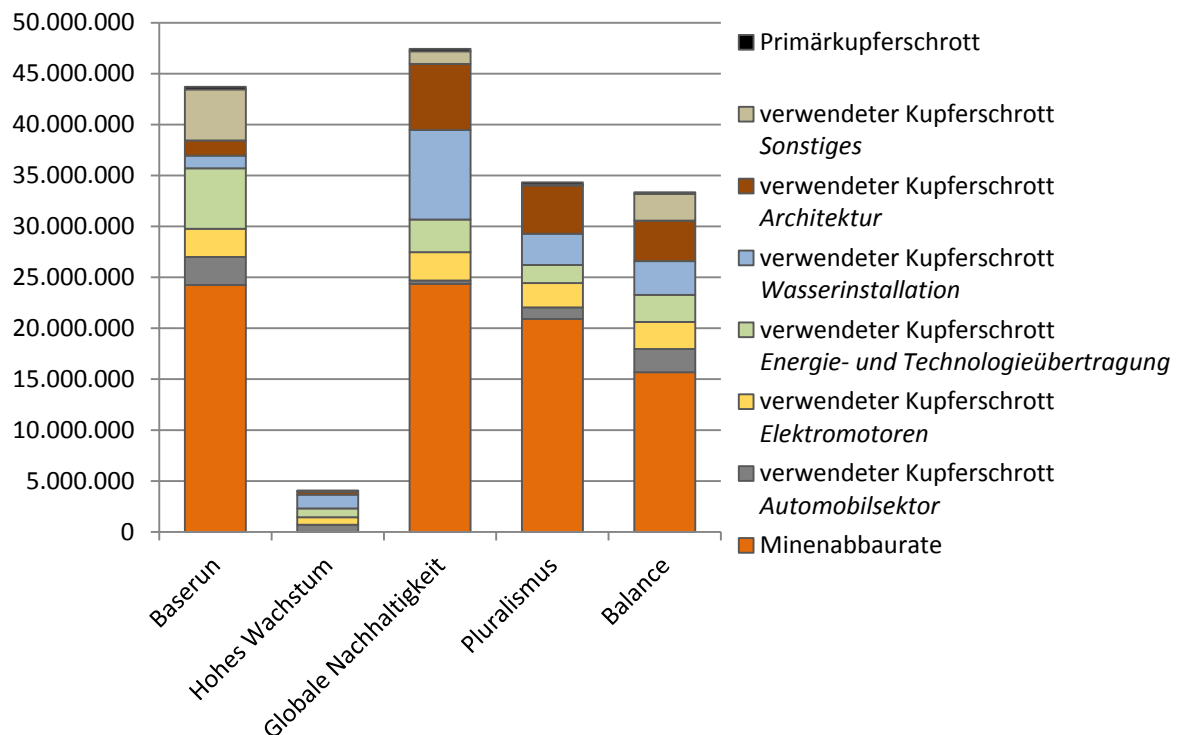


Abbildung 4-3: Vergleich des globalen Kupferangebotes aus primären und sekundären Ressourcen im Jahr 2050 der fünf Szenarien

Bei *Baserun* macht der Anteil an verwendetem Kupferschrott aus dem Bereich *Energie- und Technologieübertragung* neben *Sonstiges* den größten Anteil aus. Der Anteil am gesamten verwendeten Kupfer dieser beiden Anwendungen liegt bei 61 %. Die durchschnittliche Lebensdauer beläuft sich bei *Energie- und Technologieübertragung* auf 50 Jahre, die Sammelquote liegt bei 80 %.

Die geringste Minenabbaurate ist beim Szenario *Balance* zu beobachten. Auch der Anteil an sekundär gewonnenem Kupfer aus den unterschiedlichen Anwendungsbereichen ist hier relativ homogen verteilt und macht über die Hälfte des gesamten angebotenen Kupfers aus. Die Sammelquote ist bei dem Szenario über alle Kupferanwendungen hinweg mit 75 % veranschlagt. Die Anteile der einzelnen Produktkategorien am Gesamtkupfer sind ebenfalls homogener im Vergleich zu den anderen Szenarien. Die durchschnittliche Produktlebensdauer von *Wasserinstallation* und *Architektur* liegt mit rund 100 Jahren am höchsten. Der *Automobilsektor* und *stationäre Elektromotoren* sind durch eine mittlere Lebensdauer von 13 Jahren charakterisiert.

Im Zusammenhang mit den dargestellten Szenarienvergleichen ist die Betrachtung der Recyclingquote von Bedeutung. Folgende Faktoren, die laut Gleich beim Recycling von Wichtigkeit sind, werden im Nachfolgenden kurz beleuchtet [Gleich 2006]:

- Effizienz: Recycling unter nachhaltigen Aspekten im Verhältnis von technischem, ökologischem und ökonomischem Recycling muss bei der Prozesskette berücksichtigt werden.
- Verhältnis der Preise von Rohmaterial und Schrott.
- Viele Metalle werden nicht in ihrer Reinform verwendet, so dass sie beispielsweise in Legierungen mit anderen Metallen vergesellschaftet sind und die Reinheit nicht gewährleistet ist (Verunreinigungen).

Durch die Miniaturisierung von Elektronik werden viele verschiedene Materialien miteinander verbaut und erschweren daher ein effizientes Recycling unter nachhaltigen Aspekten und minimieren somit die Rohstoffverfügbarkeit [Gleich 2006]. Weitere Aspekte, die diese maßgeblich beeinflussen, sind die Sammelquote und Verluste im Recyclingprozess. Diese Aspekte werden in das Modell SysCu mit der Effizienzrate, Sammelquote und Rückgewinnungsrate implementiert. Da Kupfer ein vergleichsweise edles Metall ist, kann es ohne Qualitätsverluste wiederverwendet werden [BGR 2011]. Anders als bei Aluminium oder Nickel findet kein *Downcycling* statt. Da die Höhe der Recyclingquote maßgeblich von der sehr volatilen Preisentwicklung des gekoppelten Preises des primären Rohstoffes Kupfer abhängt, ist dieser Faktor sehr bedeutend für die zukünftige Entwicklung der sekundären Kupfermenge [RWI Essen *et al.* 2006; BGR 2011]. Da allerdings die globale Preisentwicklung mit vielen Unsicherheiten verknüpft ist, wird dieser Aspekt in das Modell SysCu nicht implementiert.

Die Angabe von Recyclingquoten ist oft schwierig, da empirische Daten unzureichend sind und häufig unterschiedliche Betrachtungsebenen erfolgen [Gleich 2006]. Laut Gleich kann von realistischen effektiven Quoten gesprochen werden, wenn das Verhältnis von produziertem Material zu einem Zeitpunkt x zu Material, welches zum Zeitpunkt y wieder in den Kreislauf zurückgeführt wird, betrachtet wird.

Experten gehen davon aus, dass zukünftig eine deutliche Erhöhung der weltweiten Recyclingquote realistisch ist, vor allem, da z. B. in Deutschland eine Kupferrückführungsrate von über 55 % bereits erreicht und praktikabel ist [RWI Essen *et al.* 2006]. Dzioubinski und Chipman beziffern die weltweite Kupferrecyclingquote auf rund 40 % [Dzioubinski und Chipman 1999]. Die *International Copper Study Group* hingegen geht lediglich von einer weltweiten Recyclingquote von 13 % aus [ICSG 2012]. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe gibt den Anteil sekundärer Rohstoffe für 2009 mit 18 % an [BGR 2011]. Dies macht deutlich, dass die Quoten aus der Literatur nicht sehr valide und mit großen Unsicherheiten behaftet sind [Graedel *et al.* 2002]. Bei der Betrachtung von Recyclingraten ist zu berücksichtigen, dass die Rückgewinnung von Rohstoffen häufig von Einzelpersonen oder Kleinbetrieben durchgeführt wird oder in Ländern stattfindet, in denen die Dokumentation mangelhaft ist [IIED 2002]. Insgesamt gehen Experten davon aus, dass theoretisch rund 90 % des Kupferbestandes aus Produkten technisch zurückgewonnen werden können [RWI Essen *et al.* 2006].

Die in das Modell SysCu implementierten Recyclingquoten setzen sich aus dem Produkt von Effizienz, Rückgewinnung und Sammelquote zusammen. Abbildung 4-4 zeigt die Verteilung der einzelnen Recyclingquoten je nach Kupferanwendung und Szenario. Im Szenario *Balance* ist besonders auffällig, dass die Recyclingquoten bis auf *Sonstiges* bei knapp 58 % liegen. Bei *Sonstiges* liegt die Recyclingquote bei rund 50 %. Bei den restlichen vier Szenarien ist die Recyclingquote von *Wasserinstallation* am geringsten. Dies liegt an der geringen Sammelquote. Die Rückgewinnungsquote ist mit 81 % am höchsten. Dies liegt daran, dass, falls die Produkte eingesammelt werden, ein Zerlegen und Behandeln relativ einfach umzusetzen ist und somit eine hohe Rückgewinnungsrate erreicht werden kann. Allerdings werden Kupferrohre oder Fittings beispielsweise beim Gebäudeabriss selten separiert und daher nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Dies ist ein wichtiger Grund, warum in diesem Bereich die Recyclingquote deutlich unter der der anderen Anwendungen liegt. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei *Sonstiges* ab. In diese Produktgruppe fallen viele sehr unterschiedliche Produkte, so dass auch hier die Sammelquote meist der kritische Aspekt ist. In *Balance*, *Globale Nachhaltigkeit* und *Pluralismus* ist die Recyclingquote der *Architektur* am höchsten. Die Rückgewinnungsquote beläuft sich bei allen Szenarien auf 81 %. Die Sammelquote schwankt bei diesen drei Szenarien zwischen 70 und 85 %. Im Szenario *Hohes Wachstum* ist die Sammelquote mit 60 % niedriger.

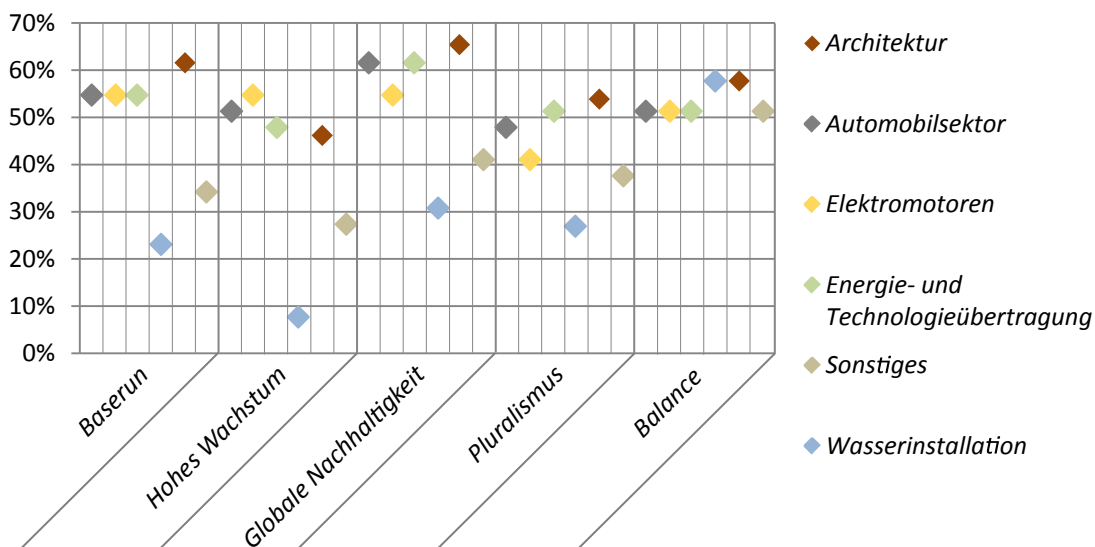


Abbildung 4-4: Vergleich der Rückführungsquoten von Sekundärkupfer nach Kupferanwendungen ab 2015 der fünf Szenarien

In der Studie von Spatari *et al.* werden konstante Recyclingquoten von 80 % bei Infrastruktur, 40 % bei Gebäuden und Bau, ebenso bei elektrischen und elektronischen Produkten aus dem Konsum- und Industriebereich angenommen [Spatari *et al.* 2005]. Beim Transportsegment liegt die Rate bei 50 %. Es wird lediglich die Recyclingquote angenommen, eine Aufschlüsselung in Effizienz- oder Sammelquote erfolgt nicht. Auch findet keine Variabilität der Raten statt. Spatari nimmt eine deutlich höhere Recyclingquote für Infrastruktur an. Die Quote für Gebäude und Bau ist ein Zusammenschluss aus *Wasserinstallation* und *Architektur*. Hier werden ähnliche Annahmen getroffen.

Kapur variiert die Recyclingraten in seinem Kupfermodell ja nach Szenario zwischen 20 und 60 % [Kapur 2006]. Vor allem die Verwendung von Kupferlegierungen und Elektrogeräten macht eine höhere Recyclingquote laut Kapur nicht realistisch. Die Quoten sind denen im Modell SysCu implementierten ähnlich.

Spatari *et al.* haben in ihren Berechnungen eine Recyclingquote von durchschnittlich 40 % verwendet, das bedeutet, dass rund 60 % des verwendeten Kupfers in anthropogene Lager gelangen [Spatari *et al.* 2005]. Unterschiedliche Arbeiten sehen in elektrischen und elektronischen Geräten das größte Kupferpotenzial aus Abfallströmen [Ayres *et al.* 2002; Spatari *et al.* 2005; Bertram *et al.* 2002]. Bertram *et al.* gehen davon aus, dass in Deponien vermehrt Elektroschrott lagern könnte, da diese Anwendungen besonders wenig in den Stoffkreislauf zurückgeführt und daher zunehmend abgelagert wurden [Bertram *et al.* 2002]. Dies lässt sich bei Betrachtung der *Stillen Reserve* und der Anteile der nicht recycelten Produktkategorien auch durch das Modell SysCu zeigen. Allerdings steckt neben den *Elektromotoren* und der *Energie- und Technologieübertragung* in der *Wasserinstallation* ein erhebliches Potenzial. Doch aufgrund der schwierigeren bzw. geringen Sammlung dürfte die Kupferanwendung *Wasserinstallation* weniger auf anthropogenen Lagerstätten wie Deponien lagern, da sie vermutlich häufig noch ausrangiert in alten Gebäudebeständen vorzufinden ist.

4.3 Rohstoffverknappung

Bei der Analyse des globalen Kupferangebotes und der -nachfrage spielt die Ressourcenverfügbarkeit eine fundamentale Rolle. Ein Indikator, der in diesem Zusammenhang häufig Anwendung findet, ist die statische Reichweite. Diese ist jedoch lediglich eine Momentaufnahme, die die dynamische Entwicklung nicht berücksichtigt [RWI Essen *et al.* 2006]. Sie wird als Früherkennungsindikator für eine absolute Rohstoffknappheit als ungenügend angesehen, da lediglich das Verhältnis der momentanen Reserven zur aktuellen jährlichen Fördermenge eines Rohstoffs berechnet wird. Weder die Größe der Vorkommen, Minenabbaukosten, Rohstoffpreislevel noch technologische Entwicklungen und Explorationsaktivitäten werden hierbei berücksichtigt [Wellmer und Wagner 2006]. Endres und Querner erklären, dass ein zukunftsorientierter und aussagekräftiger Knappheitsindikator nicht nur den gegenwärtigen Verbrauch und die aktuelle Reservesituation widerspiegeln sollen, sondern die Dringlichkeit des zukünftigen Ressourcenproblems berücksichtigen soll [Endres und Querner 2000]. Diesen Anspruch erfüllt die statische Reichweite nicht. Mithilfe des Modells SysCu ist es möglich, die Ressourcenverfügbarkeit von Kupfer dynamisch darzustellen. Hierbei spielen einerseits die vorhandene geogene Kupfermenge eine Rolle, ebenso wie die bisher abgebaute Menge, die Produktlebenszyklen und das mögliche Wieder-Zurückführen in den Stoffkreislauf.

Die Ergebnisse der fünf Szenarien haben gezeigt, dass auch bei einer Steigerung der Recyclingquote die globale Kupfernachfrage in den kommenden Jahrzehnten nicht gestillt werden kann. Die Reichweite der geogenen Kupferreserven ist demnach zwischen 2045 (*Hohes Wachstum*) und 2068 (*Balance*) erschöpft. Im Szenario *Globale Nachhaltigkeit* und *Balance* entspannt sich die Lage auf dem Rohstoffmarkt etwas, da hier eine Nutzung der *Stillen Reserve* angenommen wird. Die im Modell SysCu modellierten Reichweiten sind vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Studien.

Kapur hält eine mögliche Rohstoffverknappung von Kupfer bereits ab 2033 für möglich [Kapur 2006]. Seine Aussage basiert auf der Annahme, dass die geogenen Ressourcen bei $1.600 \cdot 10^6$ Mg Cu liegen. Eine Unterscheidung zwischen Ressourcen, Reservebasis und Reserven trifft Kapur nicht. Auch bei einer Ausweitung der weltweiten Ressourcen auf $2.600 \cdot 10^6$ Mg Cu sieht der Autor die Möglichkeit, dass die primären Kupfervorkommen zwischen 2035 und 2060 erschöpft sind.

Zeltner *et al.* haben in ihrer Studie eine Verfügbarkeit des ökonomisch-abbaubaren Kupfers von 30 bis 50 Jahren erhoben, unter der Prämisse, dass sich der weltweite Kupferkonsum nicht grundlegend verändern wird [Zeltner *et al.* 1999].

Diese Ergebnisse zeigen auf, dass der modellierte Zeithorizont von primär gewinnbarem Kupfer sehr begrenzt ist und es in den kommenden Jahrzehnten zu einer Kupferverknappung kommen wird. Durch die Steigerung der Ressourceneffizienz, beispielsweise durch den materialsparenden Einsatz in Produktionsprozessen, eine Erhöhung der Produktlebensdauer und Reparaturfreundlichkeit sowie bessere Rezyklierbarkeit kann der Zeitpunkt hinausgezögert werden [BMZ 2011]. Recycling und auch die Verwendung von Substituten können eine nachhaltige Ressourcenwirtschaft ermöglichen [Messner 2006]. Da Kupfer sehr bedeutend für den Erhalt einer modernen Gesellschaft für heutige aber auch zukünftige Generationen ist, speziell im Hinblick auf Elektrizität und Wärmeversorgung, und noch kein adäquates Substitut gefunden wurde, ist ein nachhaltiger Gebrauch unumgänglich. Wellmer und Wagner sehen für die Betrachtung von Recyclingquoten und deren Bedeutung zwei Perspektiven [Wellmer und Wagner 2006]. Einerseits die maximale Nutzung des Schrotts oder aber die Minimierung umweltrelevanter Aspekte wie das Reduzieren des Energiekonsums und somit der CO₂-Emission. Zeltner *et al.* gehen in ihrer Studie davon aus, dass ein deutlicher Stofftransfer von den

geogenen Lagerstätten hin zu anthropogenen stattfindet [Zeltner *et al.* 1999]. Auch Kapur sieht in dem kumulierten Anteil an Kupfer in urbanen Minen wie Deponien aber auch Minentailings (feinkörnige Rückstände aus der Kupfererzgewinnung) ein erhebliches Potenzial zur Sicherung der Rohstoffvorkommen von Kupfer [Kapur 2006]. Auf diesen Aspekt wird im folgenden Kapitel eingegangen.

4.4 Rohstoffsicherung durch *Urban Mining*

Durch den weltweit steigenden Rohstoffbedarf stellt sich immer häufiger die Frage, ob, wie und in welchem Umfang Abfallströme jeglicher Art zur Rohstoffsicherung beitragen können. Aus diesem Grund rücken anthropogene Rohstofflagerstätten in Zusammenhang mit *Urban Mining* immer mehr in den Fokus [Goldmann 2010].

Unter anthropogenen Rohstofflagern versteht Goldmann:

"Unter dem Begriff 'anthropogene Rohstofflager' lässt sich subsumieren, was durch den Menschen an primären Rohstoffen aus der Geosphäre entnommen wurde, in Produkten und Anlagen eingebunden ist, als Abfall die unmittelbare Produktion- oder Nutzungsphase verlässt und das, was sich an Ablagerungen aus den verschiedenen Stufen des Wirtschaftskreislaufes ansammelte." [Goldmann 2010]

Eine Definition des *Urban Minings* von Fricke lautet:

"Urban Mining umfasst anthropogen geschaffene Lagerstätten materieller Ressourcen. [...] Prinzipiell umfasst Urban Mining auch die Ressourcen, die im Gebäude- und Infrastrukturbestand, in Leitungen und Installationen 'eingelagert' sind." [Fricke 2009]

Folgende Gründe sprechen für das *Urban Mining* [Mocker et al. 2009; Wiemer et al. 2009; Rettenberger 2010]:

- Verkürzung der Deponienachsorge und Minimierung von hohen Nachsorgekosten
- Vermeidung von Emissionen klimarelevanter Treibhausgase (Klimaschutz)
- Vermeidung der Belastung zukünftiger Generationen mit toxischen Abfällen
- Flächenrecycling, ermöglicht weitere Nutzung des Geländes

"We must constantly remember that we create new mines and replenish the inventory of copper. The new 'mines' may be somewhat different from the old ones - recycled metal ..., for example, but the new sources may be better than worse" [Simon 1996]

Experten gehen davon aus, dass der Höhepunkt der weltweiten Kupferproduktion, beschrieben durch die globale Nachfrage, in 50 bis 60 Jahren erreicht sein wird [Ayres et al. 2002]. Dem gegenüber wird das primäre Kupfervorkommen aus den bekannten Reserven nach 18 bis 28 Jahren erschöpft sein [IIED 2002]. Anthropogene Lagerstätten gelten daher als mögliches Reservoir von metallischen Rohstoffen [Lifset et al. 2002; Kapur und Graedel 2006]. Studien haben gezeigt, dass industrielle Abfallströme, die ausrangiert und deponiert werden, höhere Erzkonzentrationen aufweisen als typische geogene Erzvorkommen [Allen und Behmanesh 1994; Quaghebeur et al. 2013].

Das Ressourcenpotenzial von Kupfer, welches sich in noch in Gebrauch befindlichen bzw. ausrangierten Produkten befindet, die nicht recycelt werden und somit in den Abfallstrom fließen, wurde bereits in mehreren Studien betrachtet [Graedel und UNEP 2010; Ayres et al. 2011; Wittmer und Lichtensteiger 2007; Klinglmair und Fellner 2010]. Die Kupfermenge in Deponien wird von Kapur und Graedel auf rund $400 \cdot 10^6$ Mg Cu geschätzt [Kapur und Graedel 2006]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch [Kapur 2006; Wittmer et al. 2007; Krook und Baas 2013]. Sie gehen davon aus, dass das Verhältnis von sich in Gebrauch befindlichem Kupfer und ausrangiertem Kupfer 1 : 1 beträgt [Kapur und Graedel 2006]. Etwa zwei Drittel des ausrangierten Kupfers lagern in Deponien, der Rest befindet

sich primär in Tailinglagern [Kapur 2006]. Dieses Verhältnis dürfte sich laut Expertenmeinung in den kommenden Jahren nicht verändern, lediglich absolut gesehen signifikant ansteigen. Bei der Betrachtung speziell von *Landfill Mining* (Nutzbarmachung von Deponien) spielen neben dem Ressourcenpotenzial auch die Berücksichtigung einer Kosten-Nutzen-Analyse sowie Machbarkeitsstudien eine entscheidende Rolle [van der Zee *et al.* 2004]. Deponien sind durch unterschiedliches Alter, Lokalisation und Ablagerungstypen charakterisiert [Krook *et al.* 2012; Quaghebeur *et al.* 2013]. Daher müssen bei der Betrachtung des Ressourcenpotenzials stets eine Differenzierung und detaillierte Analyse vorgenommen werden.

Mithilfe des Modells SysCu ist es möglich, eine grobe Verteilung der Kupferanwendungen abzubilden. Je nach Sammelquote und Produktlebensdauer schwanken die Anteile in der *Stillen Reserve* erheblich (Abbildung 4-5, Abbildung 4-6).

Im Jahr 2000 war im Szenario *Balance*, *Hohes Wachstum* und *Globale Nachhaltigkeit* der Anteil an stationären Elektromotoren mit rund 40 % am höchsten. *Wasserinstallation* folgte mit etwa einem Viertel der *Stillen Reserve*. Im Szenario *Pluralismus* und *Balance* verändert sich dies. Grund hierfür ist die längere Lebensdauer von *Wasserinstallation*. Der Anteil an *Sonstiges* und der *Energie- und Technologieübertragung* macht bei allen Szenarien lediglich einen Anteil von maximal 15 % aus, obwohl beide Kupferanwendungen einen sehr großen Anteil an den Kupferanwendungen insgesamt haben. Eine Erklärung hierfür ist, dass die *Energie- und Technologieübertragung* eine Recyclingquote von knapp 55 % besitzt. Daher gehen lediglich 45 % des darin befindlichen Kupfers ungenutzt in anthropogene Lagerstätten. Ähnlich sieht dies bei *Sonstiges* aus. Im Szenario *Balance* wird die Rolle der *Wasserinstallation* als bedeutende Kupferquelle deutlich.

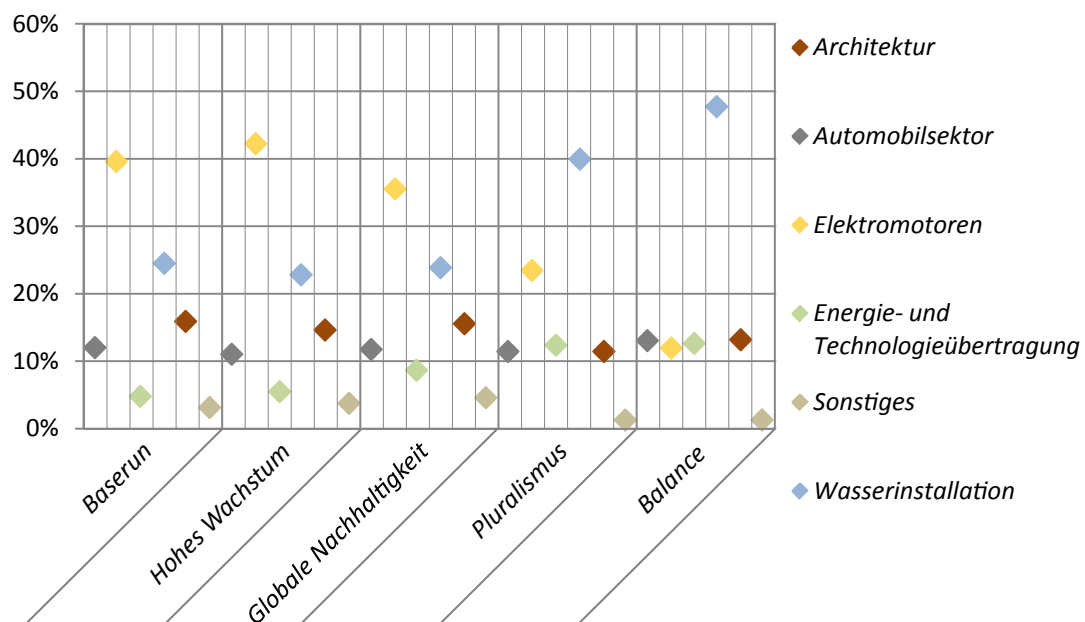


Abbildung 4-5: Anteile der Kupferanwendungen in der *Stillen Reserve* im Jahr 2000

Bis zum Jahr 2050 verschiebt sich die prozentuale Zusammensetzung der einzelnen Kupferanwendungen an der *Stillen Reserve* je nach Szenario teils deutlich (Abbildung 4-6). Vor allem bei *Balance* sinkt der Anteil an *Wasserinstallation* auf rund 30 %. *Elektromotoren*, der *Automobilsektor*, *Architektur* und *Energie- und Technologieübertragung* haben einen gesamten Kupferanteil von rund

zwei Drittel an der gesamten *Stillen Reserve*. Im Szenario *Hohes Wachstum* sinkt der Kupferanteil aus *Wasserinstallation* auf etwa 12 %. Der *Automobilsektor* und *Architektur* rangieren auf Platz zwei und drei. Da der Anteil an Kupferprodukten des *Automobilsektors* in diesem Szenario von 11 auf 17 % ansteigt und die durchschnittliche Produktlebensdauer lediglich bei 8 Jahren liegt, wird mehr Kupfer in den Kreislauf zugeführt. Die Recyclingquote sinkt minimal, so dass mehr Kupfer in der *Stillen Reserve* abgelagert wird. Wichtig ist hierbei, dass bei diesem Szenario die geogenen Kupferreserven erschöpft sind. Das abgelagerte Kupfer stammt demnach ausschließlich aus älteren ausrangierten Produkten.

Im Jahr 2100 ist laut den Ergebnissen des Modells SysCu kein primäres Kupfer mehr zu gewinnen. Alles im Umlauf befindliche Kupfer stammt aus dem Sekundärkreislauf. Die Szenarien *Globale Nachhaltigkeit* und *Balance* implementieren die Nutzung der *Stillen Reserve*. Die absoluten Kupfervorkommen anthropogener Lager werden hierbei kontinuierlich minimiert. Bei der Modellierung wurde allerdings keine Unterscheidung vorgenommen, welche Kupferanwendungen aus der *Stillen Reserve* wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden. Der relative Anteil verändert sich daher nur minimal im Vergleich zu 2050. Wie auch in den Betrachtungen von 2000 (Abbildung 4-5), spielen die *Wasserinstallation* und die *stationären Elektromotoren* eine bedeutende Rolle bei der *Stillen Reserve*.

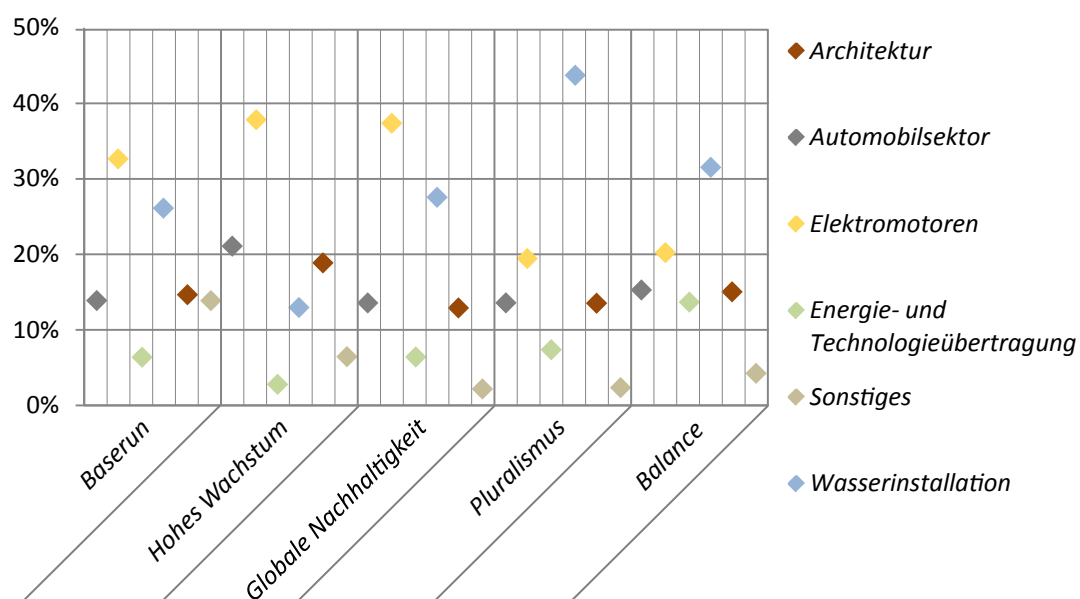


Abbildung 4-6: Anteile der Kupferanwendungen in der *Stillen Reserve* im Jahr 2050 der fünf Szenarien

Diverse Studien haben sich mit dem Rohstoffpotenzial von Deponien bereits beschäftigt [Gäth und Nispel 2011; Nispel 2012; Wiemer *et al.* 2009; Jones *et al.* 2013; Klinglmair und Fellner 2010; Wittmer *et al.* 2007]. Ein besonders großes Potenzial wird bei dem geplanten *Landfill Mining* Projekt auf der REMO Deponie in Belgien erwartet. Ein mehr oder minder vollständiger Deponierückbau der rund $18 \cdot 10^6$ Mg abgelagerten Ressourcen sowie die Möglichkeit der Energiegewinnung wird als erhebliches Potenzial angesehen [Jones *et al.* 2013]. Das Einsparpotenzial von Treibhausgasen gegenüber eines *Business-as usual* wird mit rund $1 \cdot 10^6$ Mg CO₂-Äquivalenten beziffert [Van Passel *et al.* 2013].

Da bei der Verwendung von Sekundärmaterial aus anthropogenen Kupferbeständen weniger primäres Kupfer abgebaut werden muss, ergeben sich hieraus erhebliche ressourcenschonende und

ökologisch-nachhaltige Aspekte [BGR 2011]. Kupfer zählt zu den zehn umweltintensivsten Stoffen [Lucas *et al.* 2007]. Daher stellt das *Urban Mining* in Kombination mit der Erhöhung der Recyclingquote eine starke nachhaltige Alternative dar [Van Passel *et al.* 2013; Frändegård *et al.* 2013]. Kupfer erfüllt alle Voraussetzungen, um hohe Recyclingquoten zu erreichen, leichter als Aluminium oder Zink, da es meist in seiner reinen Form Verwendung findet [Rombach 2006]. Wie bereits erwähnt findet kein *Downcycling* statt.

Die Studie des RWI Essen *et al.* geht bei einem starken zukünftigen Nachfrageanstieg von einem deutlichen Anstieg der Recyclingquote aus [RWI Essen *et al.* 2006]. Diese Annahme wird auch in dem Modell SysCu implementiert. Nach ihrer Meinung hat das Kupferrecycling ein erhebliches Potenzial, um eine Entkopplung von dem Primärkupferbedarf herbeizuführen und somit erheblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung der Nachfragesektoren. Ein Nachfrageanstieg kann demnach zusätzliche wirtschaftliche Anreize schaffen und somit zu hohen Recyclingquoten und auch dem Ausbau von *Urban Mining* führen.

Generell ist *Urban Mining* eine Möglichkeit, die steigende Kupfernachfrage auch zukünftig decken zu können. Vor allem die erheblichen Umweltauswirkungen der primären Kupfergewinnung und die Einsparpotenziale durch die Verwendung von Sekundärkupfer werden zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Die Wiedernutzbarmachung bisheriger ungenutzter anthropogener Lager stellt hierbei eine gute Alternative dar. Da die abbauwürdigen Erzgehalte seit Jahrzehnten sinken, liegen die Gehalte anthropogener Lager schon bereits heute über denen primärer Kupferminen. Aufgrund der starken Lokalisation könnte eine effiziente Rückgewinnung erfolgen. Wie schon bereits erwähnt, gilt es hier besonders, Machbarkeitsstudien durchzuführen und genau zu prüfen, welche Lagerstätten ein größtmögliches Potenzial bergen. Da die Preisentwicklung ein entscheidender Faktor bei der Umsetzung von *Urban Mining* Projekten spielt, wird der Zeithorizont, wann und in welchem Umfang *Urban Mining* rentabel und praktikabel ist, ein spannender Aspekt zukünftiger Forschungsvorhaben sein.

"A model is a substitute for the real system. [...] They are useful when they help us learn something new about the systems they represent."
[Ford 1999]

5 Schlussfolgerung und Ausblick

"We simply do not know whether mineral commodities will become more or less available in the long run. The optimists cannot prove the pessimists wrong, nor can the pessimists prove the optimists wrong. So perhaps the most reliable prediction about the future threat of mineral depletion is that the debate will continue." [Tilton 2003]

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass mittelfristig innerhalb der kommenden 35 bis 55 Jahre die primären geogenen Kupferressourcen erschöpft sein werden. Dies konnte mithilfe fünf verschiedener realistischer Szenarien des zukünftigen Kupferkonsums aufgezeigt werden. Die Beurteilung basiert auf dem simplifizierten *System Dynamics*-Modell SysCu, welches Angebot und Nachfrage berücksichtigt. Die Analyse führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Durch die Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Rohstoffsystems Kupfers im Modell SysCu kann eine zukunftsweisende Aussage bezüglich der Kupferreichweite, basierend auf den Kupferreserven und der Reservebasis, getroffen werden. Das Modell SysCu ermöglicht es, mithilfe der beschriebenen Szenarien mögliche Ereignisse darzustellen und gibt somit valide Aussagen bezüglich der zukünftigen primären Rohstoffsicherheit. Demnach wird eine Erschöpfung der primären Kupferreserven in den kommenden 35 bis 55 Jahren erreicht sein. Aufgrund der steigenden Nachfrage findet somit eine Verknappung statt, so dass die bisher explorierten Reserven inklusive der Reservebasis der geogenen Kupfervorkommen zum Erliegen kommen.
- Bis zum Jahr 2100 ist allerdings nicht davon auszugehen, dass die globalen geogenen Kupferressourcen erschöpft sein werden. Allerdings dürften die abgebauten Kupfererzgehalte immer weiter sinken, so dass auch die Ressourcen minimiert werden und ein immer höherer Aufwand betrieben werden muss, um immer geringere Kupfererzgehalte zu extrahieren. Hierbei findet eine Verlagerung von den Kupferressourcen hin zu den Reserven statt. Die Umweltauswirkungen sind dabei erheblich.

- Bei der Betrachtung der abbauwürdigen Kupfervorkommen spielen die Preisentwicklung und der technologische Fortschritt eine entscheidende Rolle. Hinzu kommen die Preisentwicklung und die Knappheit von möglichen Substituten. Kupfer ist allerdings aufgrund seiner charakteristischen Eigenschaften wie der hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit in einigen Anwendungen nicht bzw. kaum ersetzbar. Die Faktoren, die die Abbauwürdigkeit direkt bedingen, sind allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet und lassen daher keine valide Aussage diesbezüglich zu.
- Bei der Risikobewertung einer globalen primären Kupferverknappung ist die Unsicherheit bezüglich der Ressourcen und Reserven von entscheidender Bedeutung. Unsicherheit ist sowohl im Produktionsprozess, der Anwendung und bei den Sammelquoten vorhanden. Eine einheitliche Datenerhebung würde die Quantifizierung und Modellierung der primären und sekundären Stoffkreisläufe von Kupfer verbessern. Für die Berechnung der potenziellen Kupferressourcen wurde neben den Kupferreserven und der Reservebasis auf Daten der USGS zurückgegriffen. Diese Daten sind allerdings nicht immer konsistent und Daten aus anderen Quellen umstritten. Um valide Aussagen über eine mögliche Kupferverknappung liefern zu können, scheint es von Bedeutung zu sein, die Datenqualität der Stoffströme zu verbessern bzw. einheitlich zu erfassen. Vor allem auf globaler Ebene ist dies bislang unzureichend erfolgt. Das gilt insbesondere für die Effizienz-, Verwendungs- und Sammelquoten von Kupferschrotten.
- Besonders die Erhöhung der Recyclingquote, ein Ausbau der Produktlebenszyklen und das kontrollierte Wieder-in-den-Stoffkreislauf-Führen von Kupfer stellt eine zukünftige nachhaltige Rohstoffversorgung sicher. Da Kupfer nahezu vollständig und ohne Qualitätseinbußen rezykliert werden kann, stellt die Nutzung der *Stillen Reserve* anthropogener Lager ein enormes Potenzial dar. Speziell das *Urban Mining* ist eine mögliche Zukunftsperspektive, die auch den Aspekt der Nachhaltigkeit aufgreift. Die CO₂-Einsparpotenziale, die Energie-reduzierung und Minimierung von Umweltauswirkungen durch die Nutzung sekundären Kupfers sind erheblich.
- Ziel des Modells ist es nicht, eine maximale Exaktheit an Kupferflüssen und -lagern zu generieren, sondern das System Kupfer mit seinem komplexen und dynamischen Verhalten besser zu verstehen und abzubilden. Die Produktlebensdauern und die Transferfaktoren innerhalb des Rückführungsprozesses bzw. Deponierens sollten trotz Datenlücken hinreichend berücksichtigt werden. Durch die Entwicklung unterschiedlicher Szenarien können Unsicherheiten in Modellannahmen und -werten minimiert werden. Ein Vergleich mit anderen Studien zeigt, dass die Ergebnisse des Modells SysCu valide sind und eine große Aussagekraft haben.
- Das entwickelte Modell SysCu könnte aufgrund seines simplifizierten aber aussagekräftigen Aufbaues auch auf andere metallische Rohstoffe angewendet werden. Da nur einzelne Parameter wie beispielsweise die Ressourcen oder Abbauraten verändert werden müssten, ist dies ohne einen größeren Aufwand und tiefgreifende Kenntnisse des Modellierens möglich.

Literatur

- ALLEN, D.T. UND BEHMANESH, N. 1994. Wastes as Raw Materials. In: *The Greening of Industrial Ecosystems*. National Academies Press, Washington DC, 69–89.
- ANGERER, G. UND FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2009. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage*. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- ANGERER, G., MOHRING, A., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F. UND WIETSCHER, M. 2010. *Kupfer für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*. Fraunhofer ISI.
- ARPACI, E. 2000. *Kupfer - Werkstoff der Zukunft - Trends der Technologie- und Marktentwicklung: Eine Studie im Auftrag der Otto-Brenner-Stiftung*. OBS-Arbeitsheft Nr. 16,2. Auflage, Otto-Brenner-Stiftung, Berlin.
- ARQUITT, S., HONGGANG, X. UND JOHNSTONE, R. 2005. A system dynamics analysis of boom and bust in the shrimp aquaculture industry. *System Dynamics Review* 21, 4, 305–324, DOI 10.1002/sdr.313.
- VON ARX, U. 2006. *Kupfer: Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen*. Umwelt-Wissen UW-0601-D, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz.
- ASHBY, M.F. 2012a. Resource consumption and its drivers. In: *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Butterworth-Heinemann, Waltham, MA, 15–48.
- ASHBY, M.F. 2012b. End of first life: a problem or a resource? In: *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Butterworth-Heinemann, Waltham, MA, 79–97.
- ASHBY, M.F. 2012c. *Materials and the environment eco-informed material choice*. 2. Auflage, Butterworth-Heinemann, Waltham, MA.
- ATZORI, A., FORD, D., TEDESCHI, L. UND CANNAS, A. 2012. Policy Modeling for Greenhouses Gas Emissions on Dairy Cattle Sector: the Importance of the Mild Production Improvement. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society in St. Gallen*, Wiley, St. Gallen.
- AYRES, R.U. 1996. *Industrial ecology: towards closing the materials cycle*. E. Elgar, Cheltenham, UK.
- AYRES, R.U., AYRES, L.W. UND RADE, I. 2002. The Life Cycle of copper, its Co-Products and By-Products. <http://pubs.iied.org/pdfs/G00740.pdf>.
- AYRES, R.U., HOLMBERG, J. UND ANDERSSON, B. 2011. Materials and the Global Environment: Waste Mining in the 21st Century. *MRS Bulletin* 26, 6, 477–480, DOI 10.1557/mrs2001.119.
- BADER, H.-P., SCHEIDEGGER, R., WITTMER, D. UND LICHTENSTEIGER, T. 2010. Copper flows in buildings, infrastructure and mobiles: a dynamic model and its application to Switzerland. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13, 1, 87–101, DOI 10.1007/s10098-010-0278-4.
- BARDT, H. 2008. *Sichere Energie- und Rohstoffversorgung : Herausforderung für Politik und Wirtschaft?* Deutscher Instituts-Verlag, Köln.

- VAN BEERS, D., BERTRAM, M., FUSE, K., SPATARI, S. UND GRAEDEL, T.E. 2003. The contemporary African copper cycle: One year stocks and flows. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 103, 3, 147–162.
- BERENDS, P.A.J. UND ROMME, A.G.L. 2001. Cyclicity of capital-intensive industries: a system dynamics simulation study of the paper industry. *Omega* 29, 6, 543–552, DOI 10.1016/S0305-0483(01)00043-3.
- BERENS, W. UND DELFMANN, W. 2002. *Quantitative Planung*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- BERGBÄCK, B., JOHANSSON, K. UND MOHLANDER, U. 2001. Urban Metal Flows - A Case Study of Stockholm. Review and Conclusions. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 1, 3-4, 197–211, DOI 10.1023/A:1017531532576.
- BERTRAM, M., GRAEDEL, T.E., RECHBERGER, H. UND SPATARI, S. 2002. The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecological Economics* 42, 1-2, 43–57, DOI 10.1016/S0921-8009(02)00100-3.
- BEYERS, B. 2012. Faktor X - Diashow Metall. *Faktor X*. <http://www.faktor-x.info/multimedia/diashow/diashow-metall.html> (19.08.2013).
- BGR k. A. Rohstoffwirtschaft - Lebensdauer. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Rohstoffwirtschaft/min_Lebensdauer.html (21.05.2012).
- BGR 2005. Geostandpunkt - Rohstoffe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. <http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/geostandpunkte/rohstoffe.html> (15.07.2013).
- BGR 2011. *Deutschland Rohstoffsituation 2010*. Deutsche Rohstoffagentur, Hannover.
- BGS 2007. Mineral profiles - Copper. British Geological Survey. <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html> (10.05.2011).
- BIBER, P. 2011. Analyse und Modellierung Dynamischer Systeme. Vorlesungsunterlagen Wintersemester 2011, Einführung in die Systemanalyse, München.
- BINDER, C.R., GRAEDEL, T.E. UND RECK, B. 2008. Explanatory Variables for per Capita Stocks and Flows of Copper and Zinc. *Journal of Industrial Ecology* 10, 1-2, 111–132, DOI 10.1162/108819806775545475.
- BIRKHOFF, G.D., DINER, S., FARGUE, D. UND LOCHAK, G. 1986. *Dynamical systems: a renewal of mechanism: centennial of George David Birkhoff*. World Scientific, Singapur.
- BLUMA, L. 2005. Norbert Wiener und die Entstehung der Kybernetik im Zweiten Weltkrieg: eine historische Fallstudie zur Verbindung von Wissenschaft, Technik und Gesellschaft. Dissertation, Universität Münster, Münster.
- BMZ 2011. *Entwicklungspolitisches Strategiepapier - Extraktive Stoffe*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Berlin, Bonn.
- BOLLINGER, L.A., DAVIS, C., NIKOLIĆ, I. UND DIJKEMA, G.P.J. 2012. Modeling Metal Flow Systems. *Journal of Industrial Ecology* 16, 2, 176–190, DOI 10.1111/j.1530-9290.2011.00413.x.

- BOMMER, T. 2010. Ein systemdynamisches Modell zur Erklärung der Entstehung von Premiummarken am Beispiel des Automobilsektors: ein systemdynamisches Modell mit kausalanalytischer Validierung. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- BOSSEL, H. 1994a. *Modeling and simulation*. Vieweg, Wiesbaden.
- BOSSEL, H. 1994b. *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Vieweg, Wiesbaden.
- BOSSEL, H. 2004. *Systeme, Dynamik, Simulation : Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Books on Demand, Norderstedt.
- BREWSTER, N. 2009. Outlook for commodity markets. http://www.riotinto.com/documents/Media-Speeches/MF_Global_Seminar_15_October_2009.pdf (26.06.2013).
- BRINGEZU, S. 2011. Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes) Abschlussberichte des Arbeitspakets 2: "Metallische Rohstoffe, PGM und Infrastrukturen". http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/abschlussberichte_der_aps/index.html (29.08.2013).
- BRINGEZU, S., SCHÜTZ, H., STEGER, S. UND BAUDISCH, J. 2004. International comparison of resource use and its relation to economic growth. *Ecological Economics* 51, 1-2, 97–124, DOI 10.1016/j.ecolecon.2004.04.010.
- BRUNDTLAND, G.H. 1994. Key Note Address to Symposium on Sustainable Consumption in Oslo: The Challenge of Sustainable Production and Consumption Patterns. Oslo.
- CAMPBELL, G.A. 1999. Recent trends in world metal consumption. *Minerals & Energy - Raw Materials Report* 14, 1, 15–26, DOI 10.1080/14041049909362519.
- CHEN, W.-Q. UND GRAEDEL, T.E. 2012a. Anthropogenic Cycles of the Elements: A Critical Review. *Environmental Science & Technology* 46, 16, 8574–8586, DOI 10.1021/es3010333.
- CHEN, W.-Q. UND GRAEDEL, T.E. 2012b. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900–2009. *Ecological Economics* 81, 92–102, DOI 10.1016/j.ecolecon.2012.06.008.
- CLEVELAND, C.J. UND RUTH, M. 1998. Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of Use. *Journal of Industrial Ecology* 2, 3, 15–50, DOI 10.1162/jiec.1998.2.3.15.
- CLUB OF ROME UND MEADOWS, D.H. 1972. *The limits to growth*. Earth Island Ltd, London.
- COMMODITY RESEARCH BUREAU 2010. Copper. In: *The CRB Commodity Yearbook 2010 inkl. CD*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 50–55.
- COYLE, R.G. 1996. *System dynamics modeling: a practical approach*. Chapman & Hall, London.
- DAGUM, C. 1968. On methods and purposes in econometric model building. *Zeitschrift für Nationalökonomie* 28, 3-4, 381–398, DOI 10.1007/BF01322892.
- DAIGO, I., HASHIMOTO, S., MATSUNO, Y. UND ADACHI, Y. 2009. Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 4, 208–217, DOI 10.1016/j.resconrec.2008.11.010.

- DANIELSON, L. 2010. Sustainable Development and the Research Agenda. <http://www.sdsg.org/wp-content/uploads/2010/02/10-11-06-Lowell-Institute-Presentation.pdf> (16.05.2013).
- DAVIDSON, P., STERMAN, J.D. UND RICHARDSON, G.P. 1987. A Petroleum Life Cycle Model for the United States with Endogenous Technology, Exploration, Recovery, and Demand. *The 1987 International Conference of the System Dynamics Society in China*.
- DERMAN, C. 1973. *A guide to probability theory and application*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- DESCH, G.W. UND PROBST, G. 2006. Quantitative Systemwissenschaften. Karl-Franzens-Universität Graz.
- DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2013. Deutsches Kupferinstitut - Kupfer und seine Anwendungen. http://www.kupferinstitut.de/front_frame/frameset.php3?client=1&parent=14&idcat=14&lang=1&sub=yes (03.04.2013).
- SHELL 2009. *Shell PKW-Szenarien bis 2030 - Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*. <http://s00.static-shell.com/content/dam/shell/static/deu/downloads/publications-2009shellmobilityscenarios.pdf> (21.01.2013).
- DZIOUBINSKI, O. UND CHIPMAN, R. 1999. *Trends in Consumption and Production: Selected Minerals*. United Nations Department of Economics and Social Affairs. <http://www.un.org/esa/sustdev/csd/esa99dp3.pdf> (03.01.2013).
- ECKELMAN, M.J. UND DAIGO, I. 2008. Markov chain modeling of the global technological lifetime of copper. *Ecological Economics* 67, 2, 265–273, DOI 10.1016/j.ecolecon.2008.05.020.
- ENDRES, A. UND QUERNER, I. 2000. *Die Ökonomie natürlicher Ressourcen*. Kohlhammer, Stuttgart.
- ENGHAG, P. 2004. Copper. In: *Encyclopedia of the elements: technical data, history, processing, applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 139–165.
- ERDMANN, L., BEHRENDT, S. UND FEIL, M. 2011. *Kritische Rohstoffe für Deutschland*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin.
- EUROPEAN COPPER INSTITUTE 2010. Be Curious about Copper. <http://www.copperinfo.co.uk/education/downloads/be-curious-copper.pdf> (22.04.2013).
- FAES, G. 2012. Weibullverteilung. *Basis-Lexikon Weibullverteilung*. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Weibull/basis-lexikon-weibull.html> (21.03.2013).
- FEES, E. 2012. Kybernetik. *Gabler Wirtschaftslexikon*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/12591/kybernetik-v6.html> (12.11.2012).
- FIDDAMAN, T.S. 2002. Exploring policy options with a behavioral climate–economy model. *System Dynamics Review* 18, 2, 243–267, DOI 10.1002/sdr.241.
- FISCHER-KOWALSKI, M. UND HÜTTLER, W. 1998. Society's Metabolism. *Journal of Industrial Ecology* 2, 4, 107–136, DOI 10.1162/jiec.1998.2.4.107.
- FISHER, F.M., COOTNER, P.H. UND BAILY, M.N. 1972. An Econometric Model of the World Copper Industry. *The Bell Journal of Economics and Management Science* 3, 2, 568–609, DOI 10.2307/3003038.

- FORD, A. 1997. System Dynamics and the Electric Power Industry. *System Dynamics Review* 13, 1, 57–85, DOI 10.1002/(SICI)1099-1727(199721)13:1<57::AID-SDR117>3.0.CO;2-B.
- FORD, A. 1999. *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Island Press, Washington, D.C.
- FORD, A. 2010. *Modeling the environment*. Island Press, Washington, DC.
- FORREST, D. UND SZEKELY, J. 1991. Global warming and the primary metals industry. *JOM* 43, 12, 23–30, DOI 10.1007/BF03223143.
- FORRESTER, J.W. 1962. *Industrial dynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- FORRESTER, J.W. 1969. *Urban dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- FORRESTER, J.W. 1971. *World dynamics*. Wright-Allen, Cambridge, Mass.
- FORRESTER, J.W. 1972. *Grundsätze einer Systemtheorie (Principles of systems.)*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden.
- FORRESTER, J.W. 1994. System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review* 10, 2-3, 245–256, DOI 10.1002/sdr.4260100211.
- FORRESTER, J.W. 1996. System dynamics and K-12 teachers. <http://www.core.org.cn/NR/rdonlyres/Sloan-School-of-Management/15-988Fall-1998-Spring-1999/D2310653-E3BA-4924-BE64-96C719E4B692/0/teachers.pdf> (28.02.2013).
- FOURASTIÉ, J. 1949. *Le grand espoir du XXe siècle*. Presses Université de France, Paris.
- FRÄNDEGÅRD, P., KROOK, J., SVENSSON, N. UND EKLUND, M. 2013. A novel approach for environmental evaluation of landfill mining. *Journal of Cleaner Production* 55, 24–34, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.05.045.
- FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2010. *r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien*. http://www.bmbf.de/pubRD/informationpapier_bmbf_r3.pdf (06.02.2013).
- FRICKE, K. 2009. Urban Mining - nur eine Modebegriff? *Müll und Abfall* 10, 489.
- GÄTH, S. UND NISPEL, J. 2011. Ressourcenpotenzial von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. *Müll und Abfall* 2, 61–67.
- GERST, M.D. 2009. Linking Material Flow Analysis and Resource Policy via Future Scenarios of In-Use Stock: An Example for Copper. *Environmental Science & Technology* 43, 16, 6320–6325, DOI 10.1021/es900845v.
- GERST, M.D. UND GRAEDEL, T.E. 2008. In-Use Stocks of Metals: Status and Implications. *Environmental Science & Technology* 42, 19, 7038–7045, DOI 10.1021/es800420p.
- GEYER, R. UND DOCTORI BLASS, V. 2009. The economics of cell phone reuse and recycling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47, 5-8, 515–525, DOI 10.1007/s00170-009-2228-z.

- GIUPPONI, C. k.A. System analysis and modelling for sustainability. Course "Economic of the Environment" - "Economia dell'ambiente", Universtität Venezia.
- GLEICH, A. VON 2005. Die stofflichen Grundlagen nachhaltigen Wirtschaftens - Anforderungen und Möglichkeiten. In: S. Mappus and C. Fussler, eds., *Erde 2.0-technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung*. Springer, Berlin, 118–141.
- GLEICH, A. VON 2006. Chapter 1: Outlines of a Sustainable Metals Industry. In: A. von Gleich, R.U. Ayres and S. Gössling-Reisemann, eds., *Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy*. Springer, Dordrecht, 3–39.
- GLEICH, A. VON, BRAHMER-LOHSS, M., GOTTSCHICK, M., JEPSEN, D. UND SANDER, K. 2004. *Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg - Erkenntnisse - Erfahrungen - praktische Erfolge*. Hamburg.
- GLOBAL FINANCE 2012. Countries Classified by Income Group. *Global Database - Economic Data*. <http://www.gfmag.com/tools/global-database/economic-data/12066-countries-by-income-group.html#axzz2SVxyPLdF> (06.05.2013).
- GOLDMAN SACHS 2007. Global Economics Paper No: 153 - The N-11: More Than an Acronym. <http://www.chicagobooth.edu/alumni/clubs/pakistan/docs/next11dream-march%20%2707-goldmansachs.pdf> (27.10.2011).
- GOLDMANN, D. 2010. Strategische und strukturelle Überlegungen zur effizienten Nutzung anthropogener Rohstoffpotentiale in Zeiten der Globalisierungen. *Müll und Abfall* 10, 476–481.
- GÓMEZ, F., GUZMÁN, J.I. UND TILTON, J.E. 2007. Copper recycling and scrap availability. *Resources Policy* 32, 4, 183–190, DOI 10.1016/j.resourpol.2007.08.002.
- GOONAN, T. 2010. *Copper Recycling in the United States in 2004*. USGS, Reston, Virginia.
- GORDON, R.B., BERTRAM, M. UND GRAEDEL, T.E. 2006. Metal stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103, 5, 1209–1214, DOI 10.1073/pnas.0509498103.
- GORDON, R.B., BERTRAM, M. UND GRAEDEL, T.E. 2007. On the sustainability of metal supplies: A response to Tilton and Lagos. *Resources Policy* 32, 1-2, 24–28, DOI 10.1016/j.resourpol.2007.04.002.
- GORDON, R.B., KOOPMANS, T.C., NORDHAUS, W.D. UND SKINNER, B.J. 1987. *Toward a new Iron Age?: quantitative modeling of resource exhaustion*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- GRAEDEL, T.E. 2011. The prospects for urban mining. *National Academy of Engineering* 41, 1, 43–50.
- GRAEDEL, T.E., VAN BEERS, D., BERTRAM, M. ET AL. 2004. Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper. *Environmental Science & Technology* 38, 4, 1242–1252, DOI 10.1021/es030433c.
- GRAEDEL, T.E., BERTRAM, M., FUSE, K. ET AL. 2002. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles. *Ecological Economics* 42, 1-2, 9–26.
- GRAEDEL, T.E. UND CAO, J. 2010. From the Cover: Metal spectra as indicators of development. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 49, 20905–20910, DOI 10.1073/pnas.1011019107.
- GRAEDEL, T.E. UND UNEP 2010. *Metal stocks in society: scientific synthesis*. UNEP, Nairobi.

- GRASSMANN, W.K., ZHANG, J., DYCK, R. UND OSGOOD, N. 2012. A System Simulation Model for Type 2 Diabetes in the Saskatoon Health Region. *Conference Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society in St. Gallen*, Wiley, St. Gallen.
- GRÖSSER, S. 2012. System Dynamics. *Gabler Wirtschaftslexikon*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/143837/system-dynamics-v5.html> (12.11.2012).
- GUINÉE, J., VAN DEN BERGH, J.C.J., BOELEN, J. ET AL. 1999. Evaluation of risks of metal flows and accumulation in economy and environment. *Ecological Economics* 30, 1, 47–65, DOI 10.1016/S0921-8009(98)00069-X.
- GUO, X. UND SONG, Y. 2008. Substance flow analysis of copper in China. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 6, 874–882, DOI 10.1016/j.resconrec.2007.10.003.
- HAGELÜKEN, C. UND CORTI, C.W. 2010. Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling'. *Gold Bulletin* 43, 3, 209–220, DOI 10.1007/BF03214988.
- HANSEN, L.F., DANISH, E.P.A., RAHBK, L.W. ET AL. 2000. Paradigm for Substance Flow Analyses. http://www2.mst.dk/udgiv/Publications/2000/87-7944-327-3/html/helepubl_eng.html (02.09.2013).
- HAYWARD, J. 2000. Introduction to System Dynamics - For Those Interested in its Application To Church Growth. <http://www.churchmodel.org.uk/introsystems.pdf> (09.07.2013).
- HILLENBRAND, T. 2009. Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Flörsheim.
- HILPERT, H.G. UND MILDNER, S.-A. 2013. *Nationale Alleingänge oder internationale Kooperation? - Analyse und Vergleich der Rohstoffstrategien der G20-Staaten*. SWP und BGR, Berlin.
- HOGAN, W.W. 1975. Energy policy models for project independence. *Computers & Operations Research* 2, 3-4, 251–271, DOI 10.1016/0305-0548(75)90008-8.
- HOLT, C.C. 1965. Validation and Application of Macroeconomic Models Using Computer Simulation. In: G. Fromm, ed., *The Brookings quarterly econometric Model of the United States*. McNally, Chicago.
- HOTELLING, H. 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *The Journal of Political Economy* 39, 2, 137–175.
- HUMPHREYS, D. 2001. Sustainable development: can the mining industry afford it? *Resources Policy* 27, 1, 1–7, DOI 10.1016/S0301-4207(01)00003-4.
- ICA 2007. Copper Applications Technology Roadmap. <http://www.jcda.or.jp/center/roadmap.pdf> (22.04.2013).
- ICA 2012. Copper Applications Technology Roadmap. http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/downloads/2012/11/technology_roadmap_2012_en.pdf (22.04.2013).
- ICA 2013a. The Long-Term Availability of Copper. <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2013/06/ica-long-term-availability-1303-A4-lr.pdf> (26.06.2013).
- ICA 2013b. Copper recycling and sustainability - Copper supply and demand. *Copper - the vital metal*. <http://resources.schoolscience.co.uk/CDA/16plus/sustainability/copper2.html> (22.04.2013).

- ICSG 2010. The World Copper Factbook 2010. http://www.icsg.org/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=16 (14.07.2011).
- ICSG 2012. The World Copper Factbook 2012. http://docsfiles.com/pdf_the_world_copper_factbook_2012.html (14.07.2011).
- IIED 2002. *Breaking New Ground: The Report of the Mining, Minerals and Sustainable Development Project (MMSD)*. International Institute for Environment and Development. <http://pubs.iied.org/pdfs/9084IIED.pdf> (30.01.2013).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2013. IPCC - Report. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (07.09.2013).
- JÄGER, T., SCHMIDT, S. UND KARL, U. 2009. Ein System Dynamics Modell des deutschen Strommarkts - Modellentwicklung und -anwendung in der Unternehmenspraxis. In: D. Möst, W. Fichtner und A. Grunwald, eds., *Energiesystemanalyse Tagungsband des Workshops "Energiesystemanalyse" vom 27. November 2008 am KIT-Zentrum Energie, Karlsruhe*. Univ.-Verl. Karlsruhe, 79–97.
- JONES, P.T., GEYSEN, D., TIELEMANS, Y. ET AL. 2013. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 55, 45–55, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.05.021.
- KAPMEIER, F. 1999. Vom systemischen Denken zur Methode System Dynamics. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1591/> (12.12.2012).
- KAPUR, A. 2005. The future of the red metal—scenario analysis. *Futures* 37, 10, 1067–1094, DOI 10.1016/j.futures.2005.02.011.
- KAPUR, A. 2006. The future of the red metal: discards, energy, water, residues, and depletion. *Progress in Industrial Ecology, An International Journal* 3, 3, 209, DOI 10.1504/PIE.2006.011130.
- KAPUR, A. UND GRAEDEL, T.E. 2006. Copper mines above and below the ground. *Environmental science & technology* 40, 10, 3135–3141, DOI 10.1021/es0626887.
- KHETRIWAL, D., WIDMER, R., SCHWANINGER, M. UND HILTY, L. 2012. Application of System Dynamics to Assess Mass Flows of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- KIM, D.-H. UND SAEED, K. 2012. Institutional political dynamics: political cycles between the liberal and the conservative. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- KLEIJN, R., HUELE, R. UND VAN DER VOET, E. 2000. Dynamic substance flow analysis: the delaying mechanism of stocks, with the case of PVC in Sweden. *Ecological Economics* 32, 2, 241–254, DOI 10.1016/S0921-8009(99)00090-7.
- KLINGLMAIR, M. UND FELLNER, J. 2010. Urban Mining in Times of Raw Material Shortage: Copper Management in Austria During World War I. *Journal of Industrial Ecology* 14, 4, 666–679, DOI 10.1111/j.1530-9290.2010.00257.x.

- KOCH, S. UND DÖGE, G. 2001. Statistik für Lebensdauerverteilungen. http://www.mathe.tu-freiberg.de/inst/stoch/Lehre/BNCSemDoc/Statistik_fuer_Lebensdauerverteilungen.pdf (29.04.2013).
- KROOK, J. UND BAAS, L. 2013. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *Journal of Cleaner Production* 55, 1–9, DOI 10.1016/j.jclepro.2013.04.043.
- KROOK, J., SVENSSON, N. UND EKLUND, M. 2012. Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management* 32, 3, 513–520, DOI 10.1016/j.wasman.2011.10.015.
- KUMAR, A., TEO, K.M. UND ODONI, A. 2012. A System Perspective of Cycling and Bike-sharing Systems in Urban Mobility. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- KUMAR, S. UND NIGMATULLIN, A. 2011. A system dynamics analysis of food supply chains – Case study with non-perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19, 10, 2151–2168, DOI 10.1016/j.simpat.2011.06.006.
- KWAKKEL, J.H. UND SLINGER, J.H. 2012. A System Dynamics Model-Based Exploratory Analysis of Salt Water intrusion in Coastal Aquifers. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- KWAKKEL, J.H. UND TIMMERMANS, J.S. 2012. Exploratory system dynamics: a directed search for limits to global water use. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- LABYS, W.C. 2006. *Modeling and forecasting primary commodity prices*. Ashgate; Burlington.
- LANDNER, L. UND LINDESTROM, L. 1999. *Copper in society and in the environment : an account of the facts on fluxes, amounts and effects of copper in Sweden*. Swedish Environmental Research Group, Västerås, Sweden.
- LEY, H. 2004. Nichteisenmetalle – vom Erz zum fertigen Metall. *Chemie in unserer Zeit* 4, 1, 17–24.
- LIFSET, R.J., GORDON, R.B., GRAEDEL, T.E., SPATARI, S. UND BERTRAM, M. 2002. Where has all the copper gone: The stocks and flows project, part 1. *JOM* 54, 10, 21–26, DOI 10.1007/BF02709216.
- LUCAS, R., RÖHR, A., SCHARP, M. UND BLEISCHWITZ, R. 2007. Das Rohstoffsystem Kupfer - Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. <http://www.ressourcenproduktivitaet.de/src/downloads/Kupfer%281%29.pdf> (06.06.2011).
- LUNA-REYES, L.F. UND ANDERSEN, D.L. 2003. Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics: methods and models. *System Dynamics Review* 19, 4, 271–296, DOI 10.1002/sdr.280.
- MALENBAUM, W. 1978. *World demand for raw materials in 1985 and 2000*. E/MJ Mining Information Services, New York.
- MÁRQUEZ, A.C. 2009. *Dynamic modelling for supply chain management: dealing with front-end, back-end, and integration issues*. Springer, London ; New York.
- MATTHIES, M. 2002. Einführung in die Systemwissenschaften (WS 2002/2003). <http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/syswi/skript10.pdf> (12.11.2012).

- McCOOL, J.I. 2012. *Using the Weibull distribution: reliability, modeling, and inference*. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- MEADOWS, D.H. 1980. The Unavoidable A Priori. In: J. Randers, ed., *Elements of the system dynamics method*. MIT Press, 23–57.
- MEADOWS, D.H. 2004. *The limits to growth: the 30-year update*. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction.
- MEADOWS, D.H. AND WRIGHT, D. 2010. *Die Grenzen des Denkens: wie wir sie mit System erkennen und überwinden können*. Oekom-Verlag, München.
- MENZIE, D., SOTO-VIRUENT, Y., BERMÚDEZ-LUGO, O. ET AL. 2013. Review of Selected Global Mineral Industries in 2011 and an Outlook to 2017. <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1091/OFR2013-1091.pdf> (22.05.2013).
- MENZIE, W.D., DEYOUNG, J.H. UND STEBLEZ, W.G. 2003. Some Implications of Changing Patterns of Mineral Consumption. <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-382/of03-382.pdf> (11.03.2013).
- MESSNER, F. 2006. Chapter 5: Towards a Sustainable Copper Industry? - Trends in resource use, environmental impacts and substitution in the global copper industry. In: A. von Gleich, R.U. Ayres und S. Gössling-Reisemann, eds., *Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy*. Springer, Dordrecht, 113–139.
- MILDNER, S.-A. 2011. *Konfliktrisiko Rohstoffe? - Herausforderungen und Chancen im Umgang mit knappen Ressourcen*. Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin.
- MILLING, P. 1974. *Der technische Fortschritt beim Produktionsprozess*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden.
- MINERALS EDUCATION COALITION. 2012. Per Capita Consumption in the United States per year. <http://www.mii.org/pdfs/percapita.pdf> (01.02.2013).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND VERKEHR DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG. 2010. Themenheft Ressourcenverbrauch. http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/51466/Themenheft_Ressourcenverbrauch.pdf?command=downloadContent&filename=Themenheft_Ressourcenverbrauch.pdf (06.05.2013).
- MOCKER, M., FRICKE, K., LÖH, I. ET AL. 2009. Urban Mining - Rohstoffe der Zukunft. In: 70. *Symposium des ANS e.V. - Trennen oder Verbrennen? - Chancen und Grenzen der stofflichen Verwertung*. ORBIT e.V., Weimar, 211–231.
- MOHAPATRA, P.K.J., MANDAL, P. UND BORA, M.C. 1994. *Introduction to system dynamics modeling*. Universities Press, Hyderabad.
- MORECROFT, J.D.W. 2007. *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- VON NAUCKHOFF, M.H. 2010. *Strategische Metalle und Seltenerdmetalle*. FinanzBuch Verlag, München.
- NIEMEYER, G. 1977. *Kybernetische System- und Modelltheorie: System dynamics*. Vahlen, München.
- NISHIYAMA, T. 2005. The roles of Asia and Chile in the world copper market. *Resources Policy* 30, 2, 131–139, DOI 10.1016/j.resourpol.2005.05.002.

- NISPEL, J. 2012. Ressourcenpotenzial von Hausmülldeponien - am Beispiel der Kreismülldeponie Hechingen. Dissertation, Universität Gießen, Gießen.
- OECD 2008. *OECD Environmental Outlook to 2030*. Paris. www.sourceoecd.org/environment/9789264040489 (25.10.2011).
- OLAYA, C. 2012. Models that Include Cows: The Significance of Operational Thinking. *Conference Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, Wiley, St. Gallen.
- PAPP, J.F., BRAY, E.L., EDELSTEIN, D.L. ET AL. 2008. *Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn*. USGS, Reston, Virginia. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1356/pdf/ofr2008-1356.pdf> (19.07.2011).
- VAN PASSEL, S., DUBOIS, M., EYCKMANS, J. ET AL. 2013. The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production* 55, 92–102, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.03.024.
- QUAGHEBEUR, M., LAENEN, B., GEYSEN, D. ET AL. 2013. Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production* 55, 72–83, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.06.012.
- RADETZKI, M. 2009. Seven thousand years in the service of humanity—the history of copper, the red metal. *Resources Policy* 34, 4, 176–184, DOI 10.1016/j.resourpol.2009.03.003.
- RAHMANDAD, H. UND STERMAN, J.D. 2012. Reporting guidelines for simulation-based research in social sciences. *System Dynamics Review*, 28, 4, 396–411, DOI 10.1002/sdr.1481.
- RANDERS, J. 2012. *2052: a global forecast for the next forty years*. Chelsea Green Pub, White River Junction.
- RAUCH, J.N. 2009. Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 45, 18920–18925, DOI 10.1073/pnas.0900658106.
- RAUCH, J.N. 2012. The present understanding of Earth's global anthrobiogeochemical metal cycles. *Mineral Economics*, 25, 1, 7–15, DOI 10.1007/s13563-011-0011-8.
- RAUCH, J.N. UND GRAEDEL, T.E. 2007. Earth's anthrobiogeochemical copper cycle: COPPER CYCLE. *Global Biogeochemical Cycles* 21, 2, DOI 10.1029/2006GB002850.
- RAUCH, J.N. UND PACYNA, J.M. 2009. Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles: GLOBAL METAL CYCLES. *Global Biogeochemical Cycles* 23, 2, DOI 10.1029/2008GB003376.
- RECK, B.K. UND ROTTER, V.S. 2012. Comparing Growth Rates of Nickel and Stainless Steel Use in the Early 2000s. *Journal of Industrial Ecology* 16, 4, 518–528, DOI 10.1111/j.1530-9290.2012.00499.x.
- RELLER, A., BUBLIES, T., STAUDINGER, T., OSWALD, I., MEIßNER, S. UND ALLEN, M. 2009. The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 18, 2, 127–135.
- RETTENBERGER, G. 2010. urban-mining: Die Deponie als Ressourcenquelle. www.urban-mining.com. <http://www.urban-mining.com> (06.09.2013).

- RICHARDSON, G.P. 2009. The Core of System Dynamics. In: R.A. Meyers, ed., *Encyclopedia of complexity and systems science*. Springer, New York; London.
- RICHARDSON, G.P. UND PUGH, A.L. 1981. *Introduction to system dynamics modeling*. Pegasus Communications, Waltham, MA.
- RICHMOND, B. 1993. Systems thinking: Critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamics Review* 9, 2, 113–133, DOI 10.1002/sdr.4260090203.
- RICHMOND, B. 1994. Systems thinking/system dynamics: Let's just get on with it. *System Dynamics Review* 10, 2-3, 135–157, DOI 10.1002/sdr.4260100204.
- RINNE, H. 2009. *The Weibull distribution: a handbook*. CRC Press, Boca Raton.
- RITTMANN, A. 2005. Einführung - Die Mechanismen umwelttechnischer Entwicklungen zur Förderung der Nachhaltigkeit. In: S. Mappus and C. Fussler, eds., *Erde 2.0-technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung*. Springer, Berlin, 14–22.
- ROBERTS, M.C. 1996. Metal use and the world economy. *Resources Policy* 22, 3, 183–196, DOI 10.1016/S0301-4207(97)84898-2.
- ROMBACH, G. 2006. Chapter 10: Limits of Metal Recycling. In: A. von Gleich, R.U. Ayres und S. Gössling-Reisemann, eds., *Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy*. Springer, Dordrecht, 295–312.
- ROSENAU-TORNOW, D., BUCHHOLZ, P., RIEMANN, A. UND WAGNER, M. 2009. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy* 34, 4, 161–175, DOI 10.1016/j.resourpol.2009.07.001.
- ROSNAY, J. DE. 1979. *Das Makroskop: Systemdenken als Werkzeug d. Ökogesellschaft*. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg.
- RUHRBERG, M. 2006. Assessing the recycling efficiency of copper from end-of-life products in Western Europe. *Resources, Conservation and Recycling* 48, 2, 141–165, DOI 10.1016/j.resconrec.2006.01.003.
- RUSSENBERGER, D. 1998. Untersuchung des nichtlinearen Modells von [Kreutzberg, 1998] und Erweiterung um den Ansatz des Prinzipal-Agent-Modells. http://www.russenberger.com/uni/diplomarbeit/titel_.html#labelinhalt (03.04.2013).
- RWI ESSEN, ISI UND BGR. 2006. Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. <http://www.rwi-essen.de/forschung-und-beratung/umwelt-und-ressourcen/projekte/93/> (02.04.2013).
- SCHADE, B. 2005. Volkswirtschaftliche Bewertung von Szenarien mit System Dynamics - Bewertung von nachhaltigen Verkehrsszenarien mit ESCOT (Economic assessment of Sustainability poliCies of Transport). Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe.
- SCHARP, M. UND ERDMANN, L. 2006. Chapter 14: Sustainable Use of Copper. In: A. von Gleich, R.U. Ayres und S. Gössling-Reisemann, eds., *Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy*. Springer, Dordrecht, 355–373.
- SCHIEMENZ, B. 1993. Betriebswirtschaftliche Systemtheorie. *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft* 3.

- SCHMIDT-BLEEK, F., MANSTEIN, CH. UND WEIHS, G. 1999. 1.1 The Projekt "KLAGENFURT INNOVATION"(Austria). http://www.factor10-institute.com/files/design/Klagenfurt_Innovation.pdf (04.02.2013).
- SIMON, J.L. 1996. *The ultimate resource 2*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- SINGER, D.A. 2010. *Quantitative mineral resource assessments: an integrated approach*. Oxford University Press, New York.
- SLADE, M.E. 1982. Cycles in natural-resource commodity prices: an analysis of the frequency domain. *Journal of Environmental Economics and Management* 9, 2, 138–148.
- SLADE, M.E. 1985. Noninformative trends in natural resource commodity prices: U-shaped price paths exonerated. *Journal of Environmental Economics and Management* 12, 2, 181–192.
- SÖRME, L., BERGBÄCK, B. UND LOHM, U. 2001a. Century Perspective of Heavy Metal Use in Urban Areas. A Case Study in Stockholm. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 1, 3-4, 197–211, DOI 10.1023/A:1017564407076.
- SÖRME, L., LOHM, U. UND BERGBÄCK, B. 2001b. Goods in the Anthroposphere as a Metal Emission Source A Case Study of Stockholm, Sweden. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 1, 3-4, 213–227, DOI 10.1023/A:1017516523915.
- SPATARI, S., BERTRAM, M., FUSE, K., GRAEDEL, T.E. UND RECHBERGER, H. 2002. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows. *Ecological Economics* 42, 27–42, DOI 10.1016/S0921-8009(02)00103-9.
- SPATARI, S., BERTRAM, M., GORDON, R.B., HENDERSON, K. UND GRAEDEL, T.E. 2005. Twentieth century copper stocks and flows in North America: A dynamic analysis. *Ecological Economics* 54, 1, 37–51, DOI 10.1016/j.ecolecon.2004.11.018.
- STERMAN, J.D. 1994. Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review* 10, 2-3, 291–330, DOI 10.1002/sdr.4260100214.
- STERMAN, J.D. 2000. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, Boston.
- STERMAN, J.D. 2001. System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California management review* 43, 4, 8–25.
- STERMAN, J.D. 2002. All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review* 18, 4, 501–531, DOI 10.1002/sdr.261.
- STERMAN, J.D. UND RICHARDSON, G.P. 1985. An experiment to evaluate methods for estimating fossil fuel resources. *Journal of Forecasting* 4, 2, 197–226, DOI 10.1002/for.3980040208.
- STROHHECKER, J. 2008. *System Dynamics für die Finanzindustrie: simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme*. Frankfurt-School-Verlag, Frankfurt am Main.
- SULLIVAN, D.E. 2006. *Recycled Cell Phones - A treasure of Valuable Metals*. USGS. <http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3097/fs2006-3097.pdf> (18.01.2013).

- SVIDÉN, J. AND JONSSON, A. 2001. Urban Metabolism of Mercruy Turnover, Emissions and Stock in Stockholm 1975-1995. *Water, Air & Soil Pollution: Focus* 1, 3-4, 179–196, DOI 10.1023/A:1017512423006.
- TANIMOTO, A.H., GABARRELL DURANY, X., VILLALBA, G. UND PIRES, A.C. 2010. Material flow accounting of the copper cycle in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 1, 20–28, DOI 10.1016/j.resconrec.2010.03.007.
- TATSUMI, K., DAIGO, I., MATSUNO, Y. UND ADACHI, Y. 2008. Analysis on Recycling Potential of Copper in Japan. *Journal of the Japan Institute of Metals* 72, 617–624.
- THE WORLD BANK 2013a. Population, total. <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL> (08.05.2013).
- THE WORLD BANK 2013b. GDP per capita (current US\$). <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD> (19.08.2013).
- THE WORLD BANK GROUP 2006. Background Paper - the Outlook for Metals Markets Prepared for G20 Deputies Meeting Sydney 2006. http://siteresources.worldbank.org/INTOGMC/Resources/outlook_for_metals_market.pdf (26.10.2011).
- THÉVENOT, D.R., MOILLERON, R., LESTEL, L. ET AL. 2007. Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994–2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. *Science of The Total Environment* 375, 1-3, 180–203, DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.12.008.
- THOMSON REUTERS DATASTREAM. 2013. LME Cash Copper Price Grade A Stand: 21.06.2013.
- TILTON, J.E. 1986. Atrophy in Metal Demand. *Materials and Society* 10, 3, 241–243.
- TILTON, J.E. 1990a. *World metal demand: trends and prospects*. Resources for the Future ; Distributed worldwide by Johns Hopkins University Press, Washington, D.C.
- TILTON, J.E. 1990b. The Outlook for World Metal Demand. In: J.E. Tilton, ed., *World metal demand: trends and prospects*. Resources for the Future ; Distributed worldwide by Johns Hopkins University Press, Washington, DC, 255–267.
- TILTON, J.E. 1996. Exhaustible resources and sustainable development: Two different paradigms. *Resources Policy* 22, 1, 91–97, DOI 10.1016/S0301-4207(96)00024-4.
- TILTON, J.E. 2003. *On borrowed time?: assessing the threat of mineral depletion*. Resources for the Future, Washington, DC.
- TILTON, J.E. 2009. Is mineral depletion a threat to sustainable mining. *International Conference on Sustainable Mining, Santiago de Compostela, Spain*, http://inside.mines.edu/UserFiles/File/economicsBusiness/Tilton/Sustainable_Mining_Paper.pdf (28.01.2013).
- TILTON, J.E. UND LAGOS, G. 2007. Assessing the long-run availability of copper. *Resources Policy* 32, 1-2, 19–23, DOI 10.1016/j.resourpol.2007.04.001.
- TONG, X. UND LIFSET, R. 2007. International copper flow network: A blockmodel analysis. *Ecological Economics* 61, 2–3, 345–354, DOI 10.1016/j.ecolecon.2006.03.008.
- TULINAYO, F.P. 2007. A System Dynamics Model for Supply Chain Management in a Resource Constrained Setting. Dissertation, Makerere Universität.

- ULRICH, H. 1970. *Die Unternehmung als produktives soziales System : Grundlagen der allgemeinen Unternehmenslehre*. Haupt, Bern.
- UN 2004. World Population to 2300. <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf> (28.09.2011).
- UN 2012. World Population Prospects, the 2012 Revision. *Population Division, Population Estimates and Projections Section*. http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm (26.06.2013).
- UNDP 1998. *Human development report 1998*. United Nations Development Programme. Oxford University Press, New York.
- UNEP 2011. *Recycling Rates of Metals - A Status Report*. United Nations Environment Programme. http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf (17.10.2011).
- URBANCE, R.J., FIELD, F., KIRCHAIN, R., ROTH, R. UND CLARK, J.P. 2002. Market model simulation: The impact of increased automotive interest in magnesium. *JOM* 54, 8, 25–33, DOI 10.1007/BF02711863.
- USGS 2008. *Mineral Commodity Summaries - Copper 2008*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2008-coppe.pdf> (21.01.2013).
- USGS 2009. Copper - A Metal for the Ages. <http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3031/FS2009-3031.pdf> (02.10.2012).
- USGS 2012. *Mineral Commodity Summaries - Copper 2012*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2012-coppe.pdf> (21.01.2013).
- USGS 2013. Mineral Commodity Summareis 2013. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf> (15.04.2013).
- VALENCIA, C.A. 2005. An Econometric Study of the World Copper Industry. Dissertation, Colerado School of Mines, Colorado.
- VENNIX, J.A.M. 1996. *Group model building facilitating team learning using system dynamics*. J. Wiley, Chichester; New York.
- VEXLER, D., BERTRAM, M., KAPUR, A., SPATARI, S. UND GRAEDEL, T.E. 2004. The contemporary Latin American and Caribbean copper cycle: 1 year stocks and flows. *Resources, Conservation and Recycling* 41, 1, 23–46, DOI 10.1016/j.resconrec.2003.08.002.
- VIAL, J. 1988. An econometric study of the world copper market. Dissertation, Corporación de Investigaciones Economicas para Latinoamérica, Santiago, Chile.
- VIAL, J. 2004. *Modeling Commodity Markets in the Global Economy: Familiar Findings and New Strategies*. Working Papers Series - Center on Globalization and Sustainable Development No. 18, The Earth Institute at Columbia University, Columbia.
- VOET, E. VAN DER, GUINÉE, J.B., UDO DE HAES, H.A. UND BERGH, J.C.J.M. VAN DEN. 2000. *Heavy metals: a problem solved?: methods and models to evaluate policy strategies for heavy metals*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht ; Boston.

- VAN VUUREN, D., STRENGERS, B. UND DE VRIES, B.J.M. 2002. Long-term world metal use: application of industrial ecology in a system dynamics model. In: R.U. Ayres und L.W. Ayres, eds., *A Handbook of Industrial Ecology*. Edward Elgar, 365–381.
- VAN VUUREN, D., STRENGERS, B. UND DE VRIES, H.J. 1999. Long-term perspectives on world metal use - a system-dynamics model. *Resources Policy* 25, 4, 239–255, DOI 10.1016/S0301-4207(99)00031-8.
- VAN VUUREN, D., BOUWMAN, A.F. UND BEUSEN, A.H.W. 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change* 20, 3, 428–439, DOI 10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004.
- VAN VUUREN, D. UND DE VRIES, H.J. 2000. Mitigation scenarios in a world oriented at sustainable development: the role of technology, efficiency and timing. http://www.pbl.nl/en/publications/2000/Mitigation_scenarios_in_a_world_oriented_at_sustainable_development__the_role_of_technology (03.09.2013).
- WAGNER, R. 2004. Stock-Flow-Thinking and Bathtub Dynamics - Eine Theorie von Bestands- und Flussgrößen. Dissertation, Universität Klagenfurt, Klagenfurt.
- WEIBULL, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of applied mechanics* 18, 3, 293–297.
- WELLMER, F.-W. UND WAGNER, M. 2006. Chapter 2: Metallic Raw Materials - Constituents of pure Economy. In: A. von Gleich, R.U. Ayres und S. Gössling-Reisemann, eds., *Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy*. Springer, Dordrecht, 41–68.
- WENZEL, J. 2012. Systemtheorie. www.systemische-beratung.de. <http://www.systemische-beratung.de/systemtheorie.htm> (12.11.2012).
- WENZEL, S. 2007. Ein systemdynamischer Ansatz zur techno-ökonomischen Analyse von Luftreinhaltestrategien in der Industrie. Dissertation, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) an der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- WIEDEMANN, T. 2009. Modellierung mit Vensim. Vorlesungsreihe Simulation betrieblicher Prozesse, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden.
- WIEMER, K., BARTSCH, B. UND SCHMEISKY, H. 2009. *Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen - Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung*. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen.
- WILKER, H. 2004. *Weibull-Statistik in der Praxis - Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte*. Books on Demand, Norderstedt.
- WITTMER, D. 2006. Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt - Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- WITTMER, D. UND LICHTENSTEIGER, T. 2007. Development of Anthropogenic Raw Material Stocks: A Retrospective Approach for Prospective Scenarios. *Minerals & Energy - Raw Materials Report* 22, 1-2, 62–71, DOI 10.1080/14041040701390815.

- WITTMER, D., LICHTENSTEIGER, T. UND WITTMER, D. 2007. Exploration of urban deposits: long-term prospects for resource and waste management. *Waste Management & Research* 25, 3, 220–226, DOI 10.1177/0734242X07079183.
- WOLSTENHOLME, E.F. 1990. *System enquiry: a system dynamics approach*. Wiley, Chichester; New York.
- WOLSTENHOLME, E.F. 1999. Qualitative vs. quantitative modelling: the evolving balance. *Journal of the Operational Research Society* 50, 4, 422–428, DOI 10.1057/palgrave.jors.2600700.
- WORLD BANK 2011. Middle Income Countries - What are Middle-Income Countries? *Independent Evaluation Group (IEG)*. <http://go.worldbank.org/BDZHSEY4J0> (06.05.2013).
- WUPPERTAL INSTITUT 2008. Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven. http://www.umweltbundesamt.de/ressourcen/wi_uba_kupfer_RZ_web.pdf (02.09.2011).
- WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE 2011. Material Intensity of Materials, Fuels, Transport Services, Food. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2011.pdf (06.05.2013).
- YELLISHETTY, M., MUDD, G.M. UND RANJITH, P.G. 2011. The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? *Journal of Cleaner Production* 19, 1, 78–90, DOI 10.1016/j.jclepro.2010.08.020.
- VAN DER ZEE, D.J., ACHTERKAMP, M.C. UND DE VISSER, B.J. 2004. Assessing the market opportunities of landfill mining. *Waste Management* 24, 8, 795–804, DOI 10.1016/j.wasman.2004.05.004.
- ZEIT ONLINE MOBIL. 2013. Kupfermine in Chile: Die Wassernot in Chiles Wüste. *ZEIT ONLINE mobil*. <http://mobil.zeit.de/wirtschaft/2013-05/fs-kupfermine-chile-2> (28.08.2013).
- ZELTNER, C., BADER, H.P., SCHEIDEGGER, R. UND BACCINI, P. 1999. Sustainable metal management exemplified by copper in the USA. *Regional Environmental Change* 1, 1, 31–46, DOI 10.1007/s101130050006.

Anhang

Anhang 1: Glossar

architecture	<i>Architektur, Gebäude und Konstruktion</i>
auxiliary	Hilfsgröße für Zwischenrechnungen
<i>Baserun</i>	Basislauf
car	<i>Automobilsektor</i>
collecting rate	Sammelquote
collection rate	Sammelquote
constant	Konstante
copper in scrap	Kupferschrott
copper in use	Kupfer, welches sich in Verwendung/Nutzung befindet
copper products	Kupferprodukte
copper share	Kupferanteil
current USD	aktueller US-\$
DATA	für Ex- und Import von externen Daten
DELAY	Verzögerung
demand	Nachfrage
developed	<i>entwickelte</i> Länder (Australien/Neuseeland, Europa, Nord Amerika, Japan) [UN 2004]
dissipative copper	dissipative Kupferverluste
Dmnl	dimensionslos
efficiency rate	Effizienzquote
electric motor	<i>Elektromotoren</i>
energy transmission	<i>Energie- und Technologieübertragung</i>
EXP()	Exponentiell = e^0
feedback-loop, causal loop	Rückkopplungsschleife, Regelkreis
FINAL TIME	geplante Endzeit der Simulation
flow	Flussvariable, Rate
GDP growth	Wachstum des BIPs
GDP growth rate	Wachstumsrate des BIPs
GDP per capita	Pro-Kopf-BIP
GDP world per capita	Pro-Kopf-BIP der Welt
GDP world total	Welt-BIP
GET XLS DATA ()	Programm greift auf () Excel-Datei zu, Datenaustausch mit Excel
high variant	Variante mit starkem Bevölkerungswachstum [UN 2004]
IF THEN ELSE ()	Wenn ..., dann ..., sonst ...

INITIAL	Anfangswert, Ausgangswert, Basis, für reine Initialisierung
initial ressource	Basiswert der geogenen Ressourcen
INITIAL TIME	Beginn der Simulation (Zeitpunkt = 0), hier: 1960
inner reserve of unused copper in scrap	<i>Stille Reserve</i> von nicht-rezykliertem Kupfer (beispielsweise Deponien)
INTEG()	Integral von (), ganzer Teil von ()
least developed	<i>wenig entwickelte</i> Länder (Afrika, Karibik, Südamerika außer Brasilien, Asien außer Indien, China etc.) [UN 2004]
less developed	<i>sich entwickelnde</i> Länder (Brasilien, China, Indien, Russland etc.) [UN 2004]
level variable	Zustandsvariable auf Basis eines Integrals
lifetime	Lebensdauer, Lebenszyklus, Produktlebensdauer
LN ()	Natürliche Logarithmus-Funktion (logarithmus naturalis)
lookup variable	Variable auf der Basis empirischer Vorgaben
low variant	Variante mit geringem Bevölkerungswachstum [UN 2004]
max. mining feasibility rate	maximal mögliche Abbaurate
Mg	Tonne (t)
middle variant	Variante mit mittlerem Bevölkerungswachstum [UN 2004]
mining feasibility rate	mögliche/durchführbare Abbaurate
mining rate	Abbaurate von primärem Kupfer
normal dissipative copper rate	durchschnittliche Rate von dissipativem Kupfer
normal rate of scrap	durchschnittliche Rate an Kupferschrott
others	<i>Sonstiges</i>
people	Menschen, Personen
percentage of primary scrap	prozentualer Anteil an Primärschrott
policy	Entscheidungsregel, Handlungsanweisung
production of copper products	Produktion von Kupferprodukten bzw. -applikationen
rate of primary scrap	Rate an Primärkupferschrott
recover rate	Rückführungsrate
refined copper	raffiniertes Kupfer
remaining copper	verbleibendes Primärkupfer
rerun	Wiederholungslauf
reserve base	Reservebasis
resource	Ressource
reuse	Wiederverwendung, Recycling
run	Simulationslauf

scrap	Kupferschrott
scrap rate	Quote an Kupferschrott
shadow variable	Referenz auf interne Systemvariablen oder Anwendervariablen in einem anderen Teilmodell (bei mehreren Views)
stock, level	Zustandsvariable, Statusvariable, Bestand, Zustandsgröße
switch total world population	Wechsel der Bevölkerungsentwicklungsvarianten
TIME	aktuelle Zeit des Modells
TIME STEP	zeitliche Schrittweite bei Integration, Zeitschritt, Länge des Zeitintervalls
total copper demand	gesamte globale Kupfernachfrage
total copper demand per capita	durchschnittlicher Pro-Kopf-Konsum weltweit
total copper in use	gesamtes Kupfer, welches sich weltweit in Verwendung/Nutzung befindet
total inner reserve	gesamte <i>Stille Reserve</i>
total world population	Weltbevölkerung
unused copper in scrap	nicht-rezykliertes Kupfer aus Kupferschrott
unused copper scrap	nicht-rezyklierter Kupferschrott
USD	US-Dollar
used copper scrap	rezyklierter Kupferschrott
value of GDP per capita	Wert des pro-Kopf-BIPs
view	View, Teilmodell
water installation	<i>Wasserinstallation</i>
WITH LOOKUP ()	Daten werden aus Diagramm/Grafik ausgelesen und falls nötig mittels Interpolation berechnet
year	Jahr

Anhang 2: Screenshots des Modells SysCu

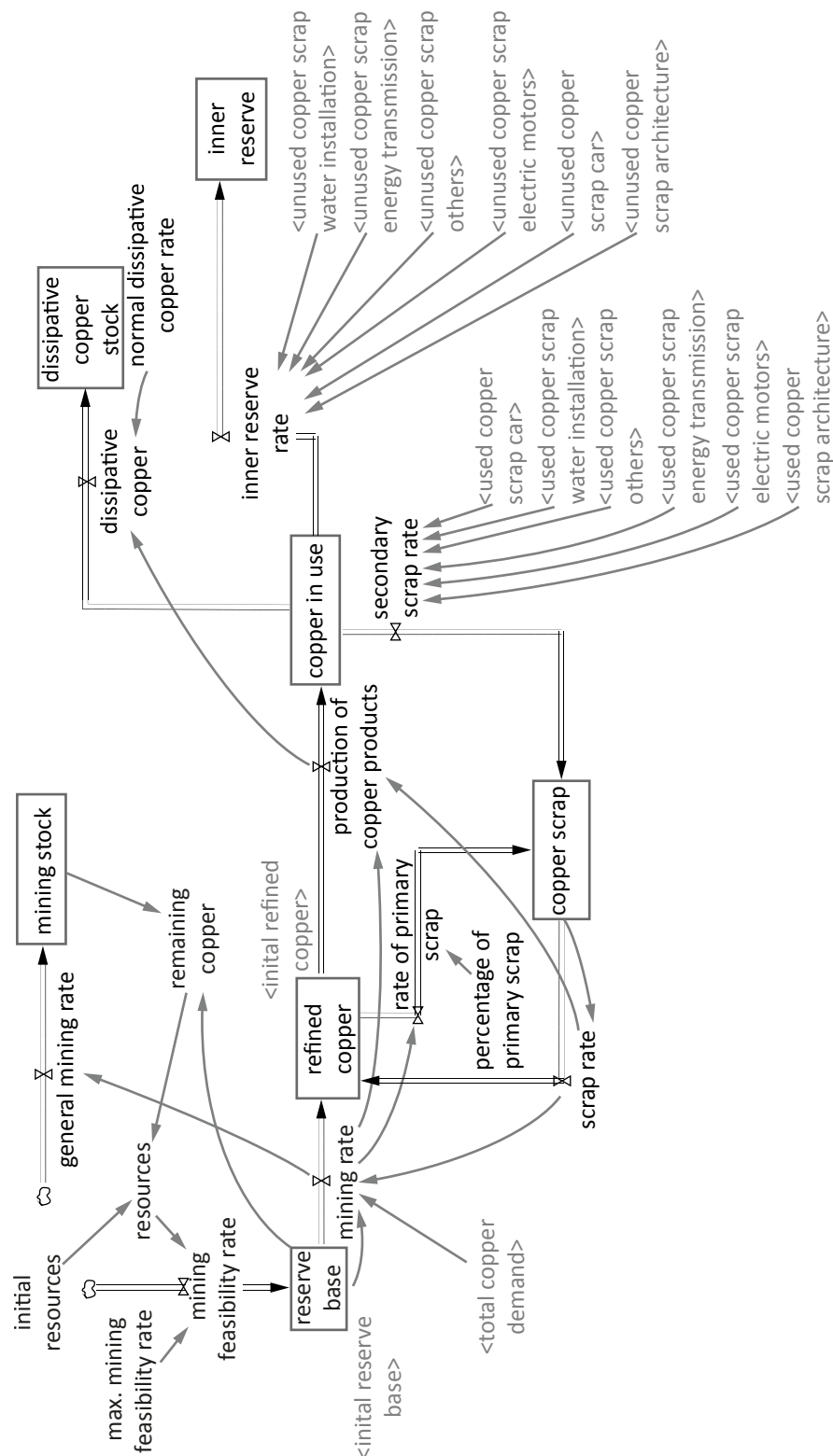


Abbildung Anhang-1: View 1 use with recycling des Modells SysCu
 Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen des primären und sekundären Stoffkreislaufs des Kupferangebots

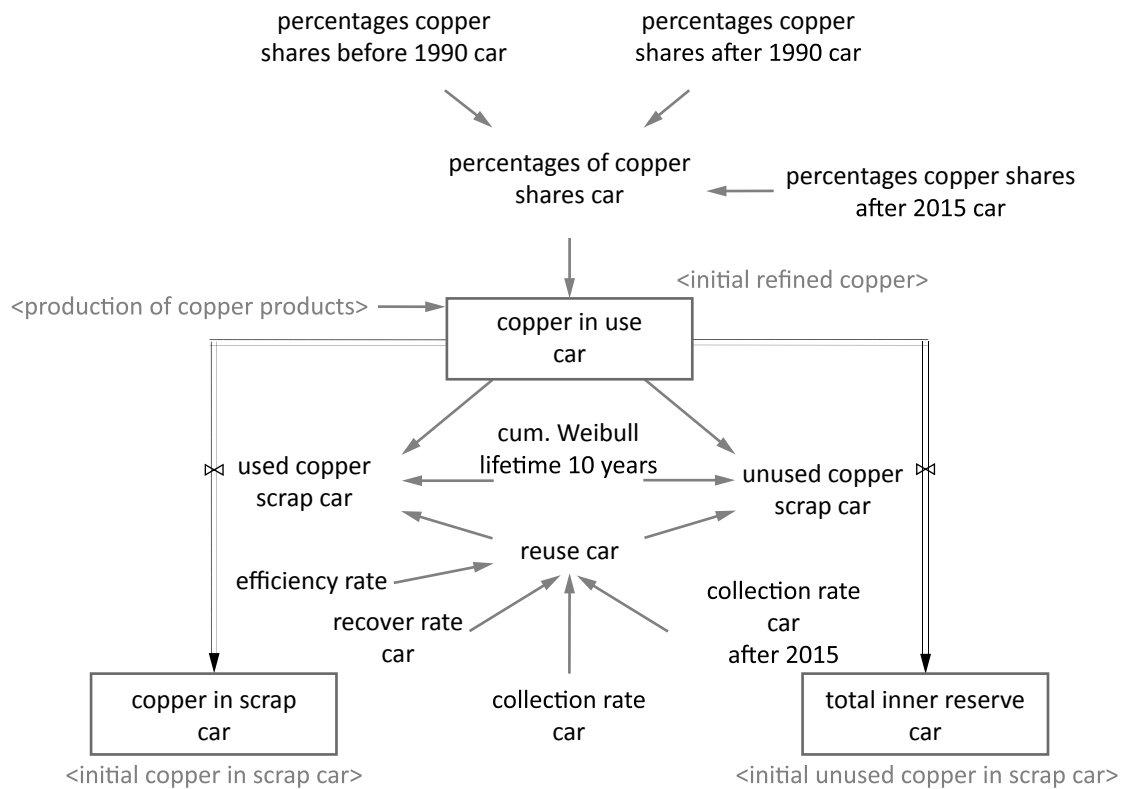


Abbildung Anhang-2: View 2 car des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung *Automobilsektor*

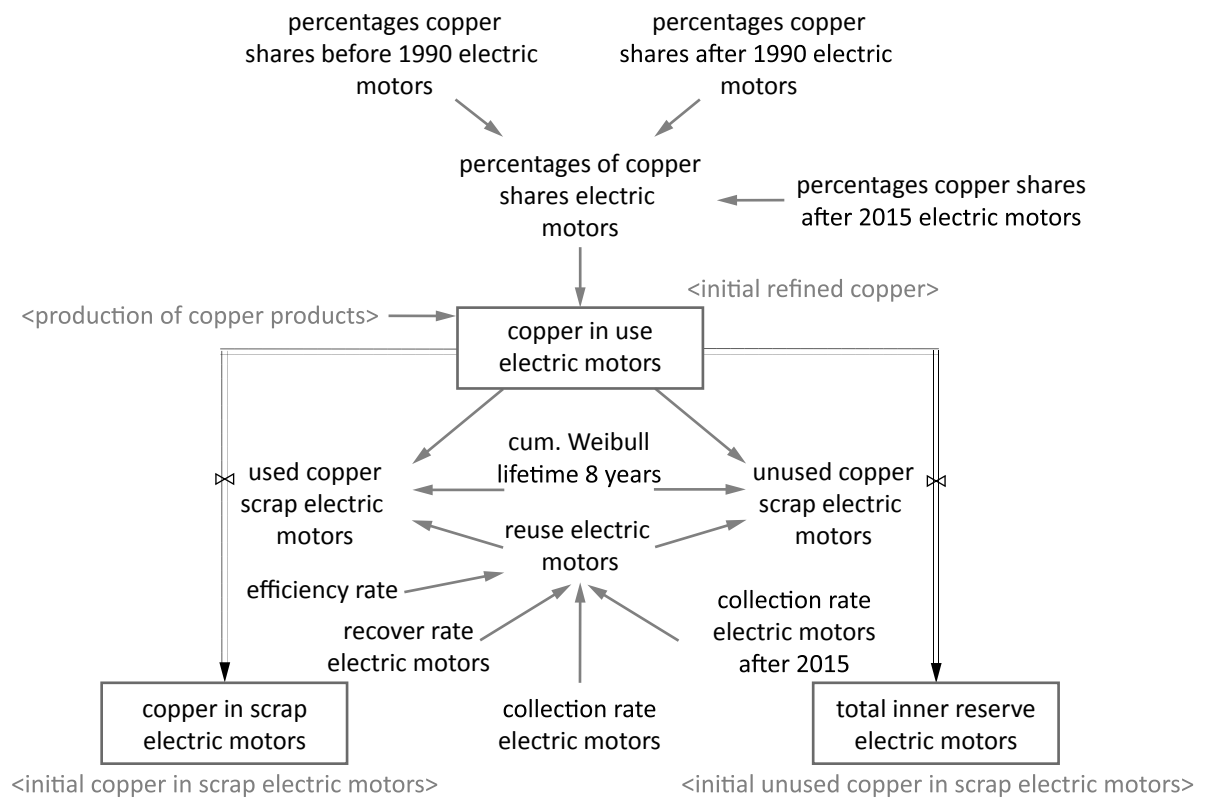


Abbildung Anhang-3: View 3 *electric motors* des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung *Elektromotoren*

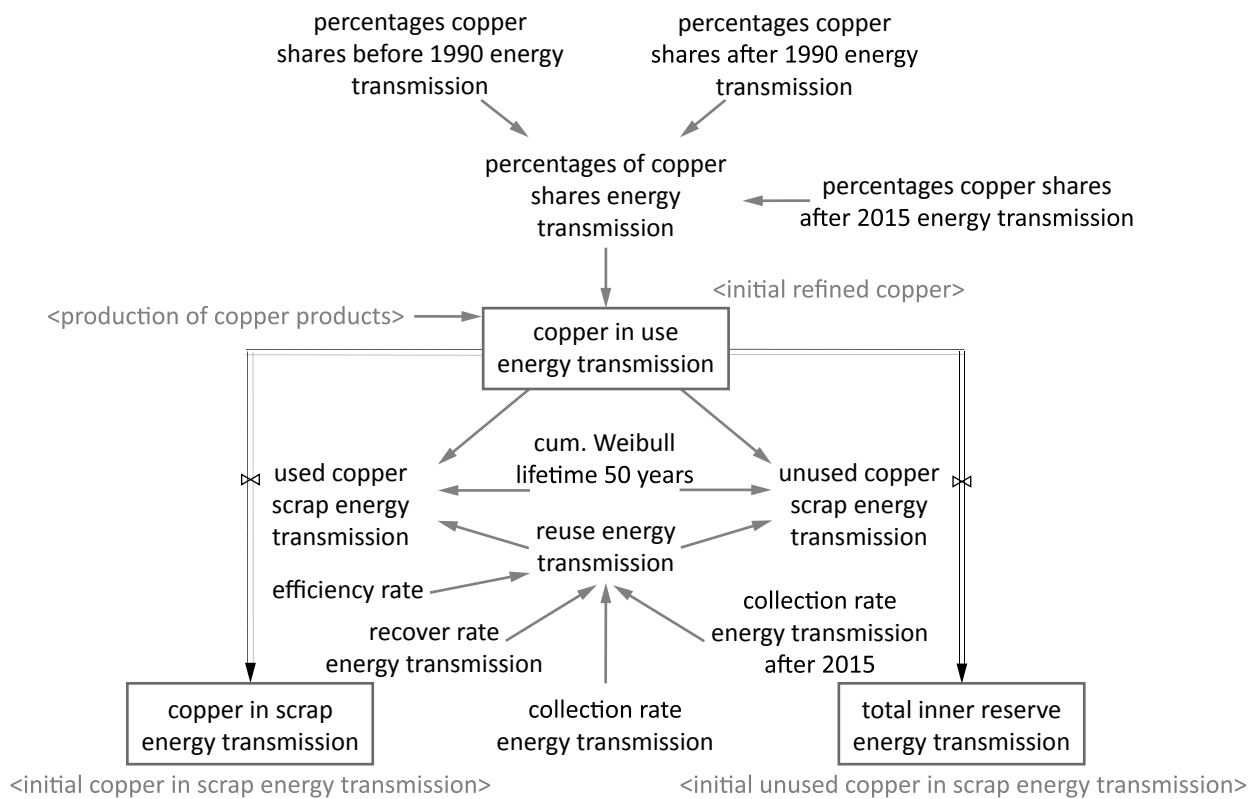


Abbildung Anhang-4: View 4 *energy transmission* des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung *Energie- und Technologieübertragung*

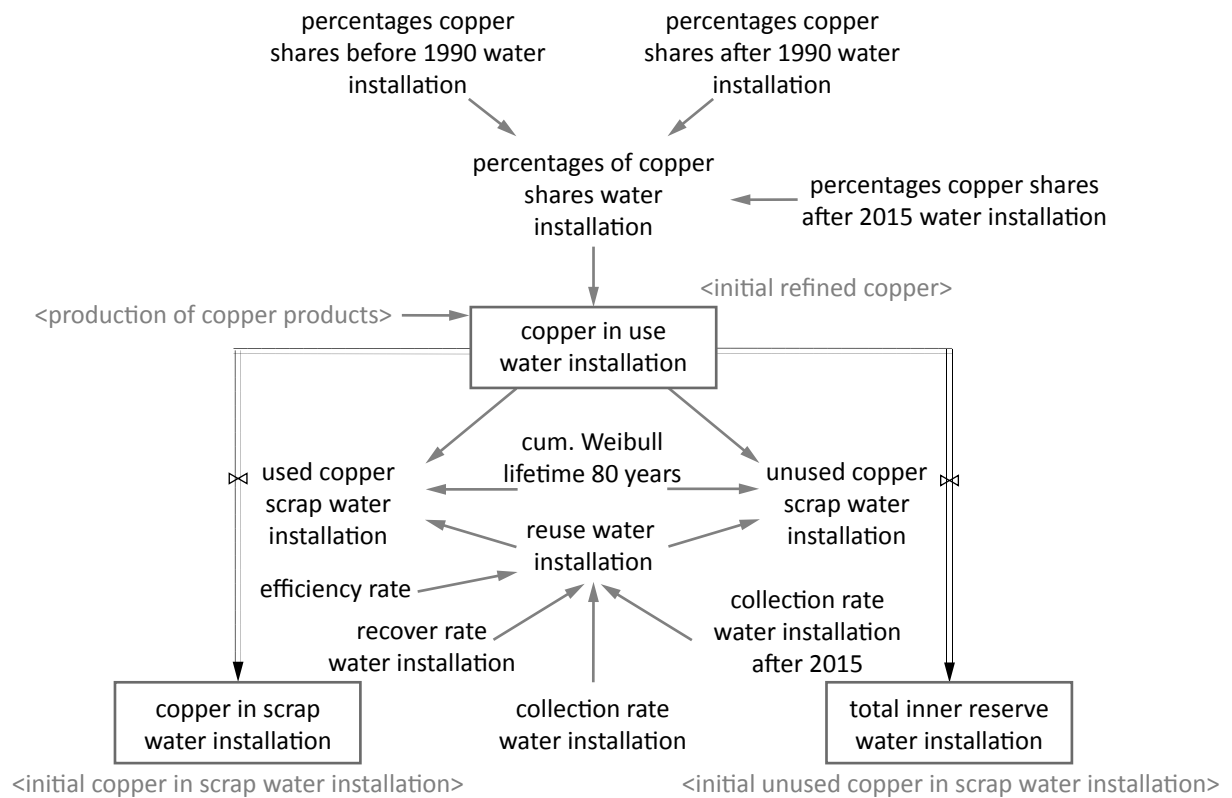


Abbildung Anhang-5: View 5 *water installation* des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung *Wasserinstallation*

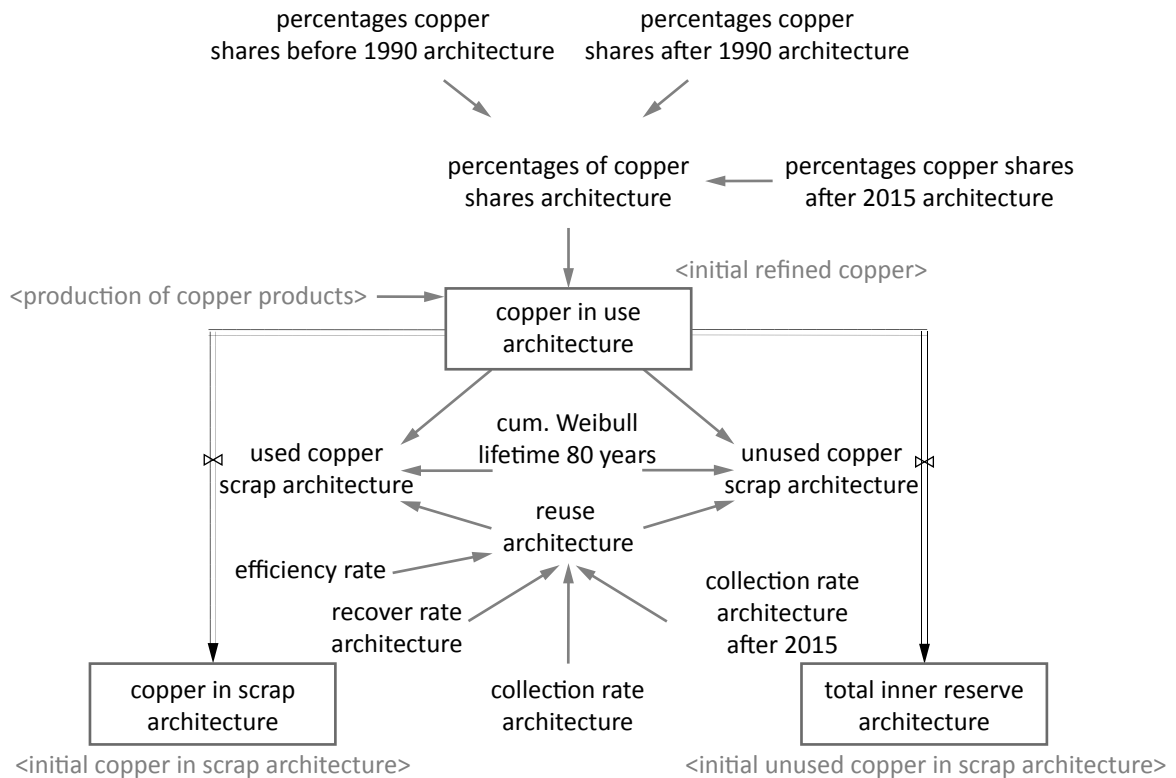


Abbildung Anhang-6: View 6 *architecture* des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung *Architektur*

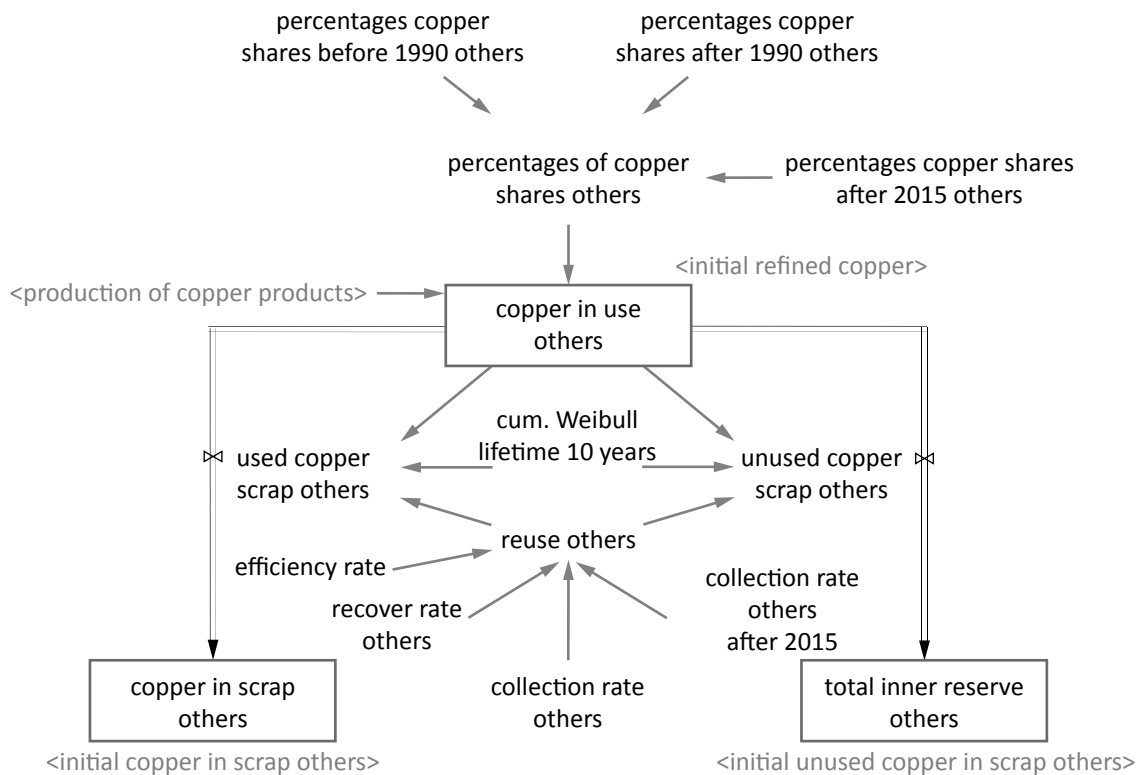


Abbildung Anhang-7: View 7 others des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung Sonstiges

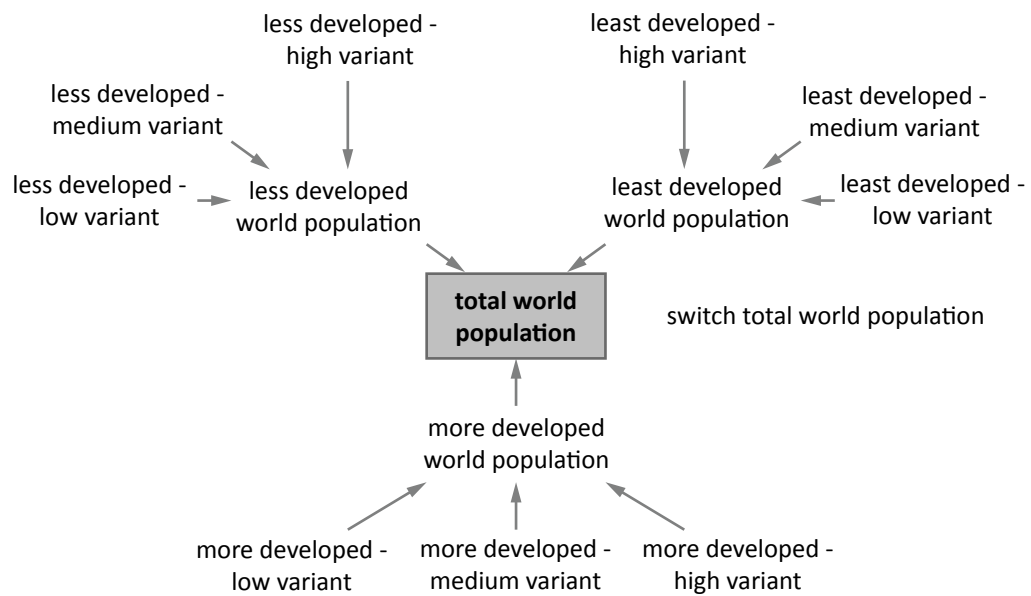


Abbildung Anhang-8: View 8 *population* des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Bevölkerung

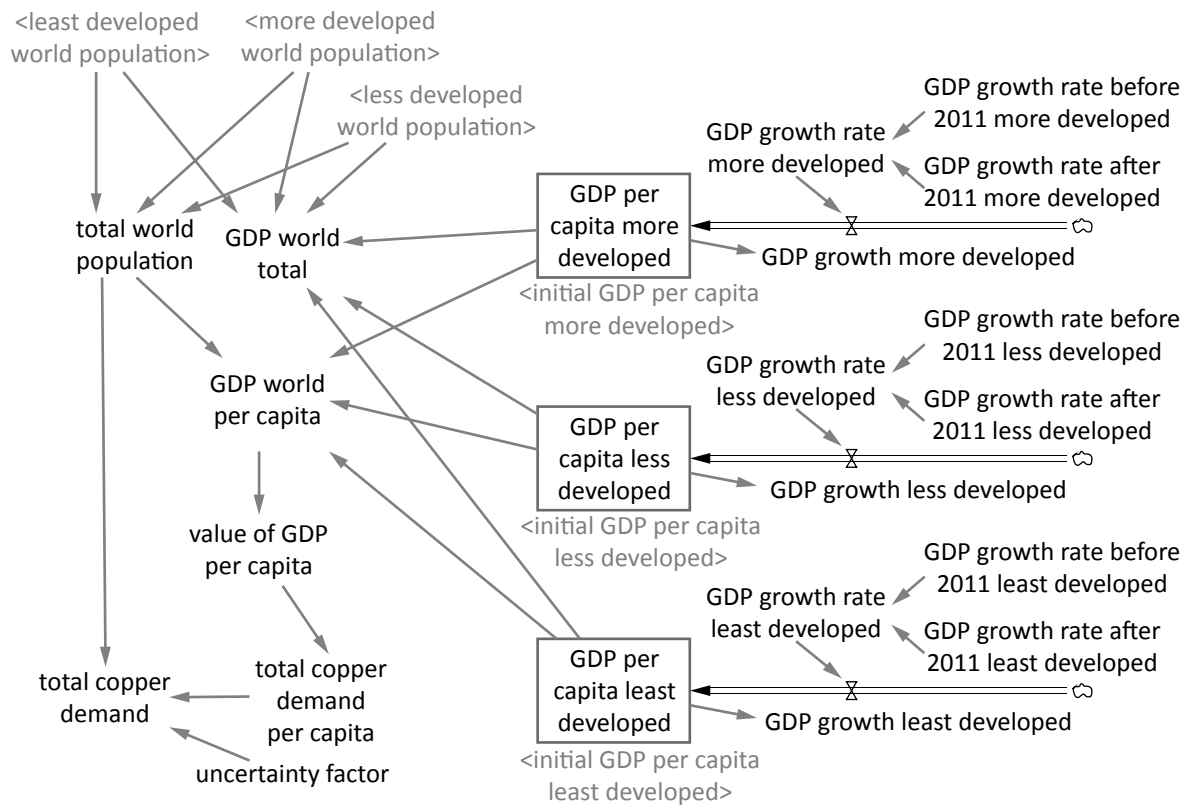


Abbildung Anhang-9: View 9 demand des Modells SysCu
Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen
sowie deren Verknüpfungen der Wirtschaftsentwicklung und der globalen Kupfernachfrage
in Abhängigkeit der Bevölkerungsentwicklung

Anhang 3: Quellcode des Modells SysCu

View 1 copper in use

copper in use = INTEG ((production of copper products-dissipative copper-secondary rate -
scrap inner reserve rate), 7.5e+006)
Units: Mg

copper scrap= INTEG(rate of primary scrap + secondary scrap rate-scrap rate, 0)
Units: Mg

dissipative copper= normal dissipative copper rate * production of copper products
Units: Mg/Year

dissipative copper stock= INTEG (dissipative copper, 7.5e+004)
Units: Mg

initial refined copper= 0
Units: Mg

initial reserve base= 9.4e+008
Units: Mg
USGS (2008)

initial resources= 3.7e+009
Units: Mg
USGS (2008 & 2012)

INITIAL TIME = 1960
Units: Year
The initial time for the simulation.

inner reserve= INTEG (inner reserve rate, 2.5e+006)
Units: Mg

inner reserve rate= unused copper scrap energy transmission + unused copper scrap car +
unused copper scrap electric motors + unused copper scrap architecture +
unused copper scrap water installation + unused copper scrap others
Units: Mg/year

max. mining feasibility rate= 1e-004
Units: 1/Year

mining feasibility rate= DELAY1 (resources * max. mining feasibility rate, 60)
Units: Mg/Year

mining rate= IF THEN ELSE (reserve base -total copper demand < 0, 0, total copper demand
- scrap rate)
Units: Mg/Year

Bei Szenario *Globale Nachhaltigkeit & Balance*:

mining rate= IF THEN ELSE (reserve base - total copper demand < 0 , IF THEN ELSE (inner reserve > 0, inner reserve*0.01 , 0), total copper demand - scrap rate)
Units: Mg/Year

mining stock = INTEG (mining rate , 1e+007)
Units: Mg

normal dissipative copper rate= 0.01
Units: 1/Year
Bertram *et al.* (2002); Graedel *et al.* (2004); Kapur und Graedel (2005)

percentage of primary scrap= 0.01
Units: Dmnl

production of copper products= mining rate + scrap rate
Units: Mg/Year

rate of primary scrap= mining rate * percentage of primary scrap
Units: Mg/Year

refined copper= INTEG (mining rate + scrap rate - production of copper products - rate of primary scrap, initial refined copper)
Units: Mg

remaining copper= IF THEN ELSE (reserve base - mining stock > 0, reserve base - mining stock , 0)
Units: Mg

reserve base= INTEG (mining feasibility rate - mining rate, initial reserve base)
Units: Mg

resources= initial resources - remaining copper
Units: Mg

scrap rate= copper scrap
Units: Mg/year

secondary scrap rate= used copper scrap architecture + used copper scrap car + used copper scrap electric motors + used copper scrap energy transmission + used copper scrap others + used copper scrap water installation
Units: Mg/year

TIME STEP = 0.25
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.

total copper demand= total world population * total copper demand per capita * uncertainty factor
Units: Mg

unused copper scrap= unused copper scrap car + unused copper scrap electric motors + unused copper scrap energy transmission + unused copper scrap others + unused copper scrap water installation + unused copper scrap architecture
Units: Mg

used copper scrap= used copper scrap architecture + used copper scrap car + used copper scrap electric motors + used copper scrap energy transmission + used copper scrap others + used copper scrap water installation
Units: Mg

View 2 car

collection rate car= 0.8
Units: Dmnl

collection rate car after 2015= 0.8
Units: Dmnl

copper in scrap car= INTEG (used copper scrap car, initial copper in scrap car)
Units: Mg

copper in use car= INTEG ((production of copper products * percentages of copper shares car) - unused copper scrap car - used copper scrap car, initial refined copper car)
Units: Mg

cum. Weibull lifetime 10 years:= GET XLS DATA ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C13')
Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95
Units: Dmnl

initial copper in scrap car= 0
Units: Mg

initial refined copper= 0
Units: Mg

initial refined copper car= initial refined copper * percentages of copper shares car
Units: Mg

initial unused copper in scrap car= 0
Units: Mg

percentage copper after 1990 car= 0.12
Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 car= 0.11
Units: Dmnl

percentages of shares of copper car= IF THEN ELSE (TIME > 1990, IF THEN ELSE (TIME > 2015, percentages copper shares after 2015 car, percentages copper shares after 1990 car), percentages copper shares before 1990 car)
Units: Dmnl

percentages copper after 2015 car= 0.12
Units: Dmnl

production of copper products= mining rate + scrap rate
Units: Mg/Year

recover rate car= 0.72
Units: Dmnl

reuse car= IF THEN ELSE (TIME > 2015, collection rate car after 2015 * efficiency rate * recover rate car, collection rate * efficiency rate * recover rate)
Units: Dmnl

total inner reserve car= INTEG (unused copper scrap car, initial unused copper in scrap car)
Units: Mg

unused copper scrap car= copper in use car * (1 - reuse car) * cum. Weibull lifetime 10 years
Units: Mg/Year

used copper scrap car= copper in use car * reuse car * cum. Weibull lifetime 10 years
Units: Mg

View 3 energy transmission

collection rate energy transmission= 0.8
Units: Dmnl

collection rate energy transmission after 2015= 0.8
Units: Dmnl

copper in scrap energy transmission= INTEG (used copper scrap energy transmission, initial copper in scrap energy transmission)
Units: Mg

copper in use energy transmission= INTEG ((production of copper products * percentages of copper shares energy transmission) - unused copper scrap energy transmission - used copper scrap energy transmission, initial refined copper energy transmission)
Units: Mg

cum. Weibull lifetime 50 years:= GET XLS DATA ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C27')
Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95
Units: Dmnl

initial copper in scrap energy transmission= 0
Units: Mg

initial refined copper energy transmission= initial refined copper * percentages of
copper shares energy transmission
Units: Mg

initial unused copper in scrap energy transmission= 0
Units: Mg

percentages copper shares after 1990 energy transmission= 0.26
Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 energy transmission= 0.085
Units: Dmnl

percentages of copper shares energy transmission= IF THEN ELSE (TIME > 1990. IF THEN ELSE
(TIME > 2015, percentages copper shares after 2015 energy
transmission, percentages copper shares after 1990 energy transmission),
percentages copper shares before 1990 energy transmission)
Units: Dmnl

percentages copper shares after 2015 energy transmission= 0.26
Units: Dmnl

recover rate energy transmission= 0.72
Units: Dmnl

reuse energy transmission= IF THEN ELSE (TIME > 2015, collection rate energy transmission after
2015 * efficiency rate * recover rate car, collection rate energy transmission *
efficiency rate * recover rate energy transmission)
Units: Dmnl

total inner reserve energy transmission= INTEG (unused copper scrap energy transmission,
initial unused copper in scrap energy transmission)
Units: Mg

unused copper scrap energy transmission= copper in use energy transmission * (1 - reuse
energy transmission) * cum. Weibull lifetime 50 years
Units: Mg/Year

used copper scrap energy transmission= copper in use energy transmission * reuse energy
transmission * cum. Weibull lifetime 50 years
Units: Mg/Year

View 4 architecture

collection rate architecture= 0.8
Units: Dmnl

collection rate architecture after 2015= 0.8
Units: Dmnl

copper in scrap architecture= INTEG (used copper scrap architecture, initial copper in scrap architecture)
Units: Mg

copper in use architecture= INTEG (production of copper products * percentages of copper shares architecture - unused copper scrap architecture - used copper scrap architecture, initial refined copper architecture)
Units: Mg

cum. Weibull lifetime 80 years:= GET XLS DATA ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C35')
Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95
Units: Dmnl

initial copper in scrap architecture= 0
Units: Mg

initial refined copper= 0
Units: Mg

initial refined copper architecture=initial refined copper * percentages of copper shares architecture
Units: Mg

initial unused copper in scrap architecture= 0
Units: Mg

percentages copper shares after 1990 architecture= 0.02
Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 architecture= 0.045
Units: Dmnl

percentages of copper shares architecture= IF THEN ELSE (Time > 30, IF THEN ELSE (Time > 55, percentages copper shares after 2015 architecture, percentages copper shares after 1990 architecture), percentages copper shares before 1990 architecture) Units: Dmnl

percentages copper shares after 2015 architecture= 0.02
Units: Dmnl

recover rate architecture= 0.81
Units: Dmnl

reuse architecture= IF THEN ELSE (TIME >55, collection rate architecture after 2015 * efficiency rate * recover rate architecture, collection rate architecture * efficiency rate * recover rate architecture)

Units: Dmnl

total inner reserve architecture= INTEG (unused copper scrap architecture, initial unused copper in scrap architecture)

Units: Mg

unused copper scrap architecture=copper in use architecture * (1 - reuse architecture) * cum. Weibull lifetime 80 years

Units: Mg/Year

used copper scrap architecture= copper in use architecture * reuse architecture * cum. Weibull lifetime 80 years

Units: Mg/Year

View 5 electric motors

collection rate electric motors= 0.7

Units: Dmnl

collection rate electric motors after 2015= 0.7

Units: Dmnl

copper in scrap electric motors= INTEG (used copper scrap electric motors, initial copper in scrap electric motors)

Units: Mg

copper in use electric motors= INTEG ((production of copper products * percentages of copper shares electric motors) - unused copper scrap electric motors - used copper scrap electric motors, initial refined copper electric motors)

Units: Mg

cum. Weibull lifetime 8 years:= GET XLS DATA ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C9')

Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95

Units: Dmnl

initial copper in scrap electric motors= 0

Units: Mg

initial refined copper= 0

Units: Mg

initial refined copper electric motors= initial refined copper * percentages of copper shares electric motors

Units: Mg

initial unused copper in scrap electric motors= 0

Units: Mg

percentage copper after 1990 electric motor= 0.12
Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 electric motor= 0.085
Units: Dmnl

percentages of copper shares electric motors=IF THEN ELSE (Time > 1990, IF THEN ELSE
(Time > 2015, percentages copper shares after 2015 electric motor,
percentages copper shares after 1990 electric motor), percentages
copper shares before 1990 electric motor)
Units: Dmnl

percentages copper after 2015 electric motor= 0.12
Units: Dmnl

recover rate electric motors= 0.72
Units: Dmnl

reuse electric motors= IF THEN ELSE (TIME > 2015, collection rate electric motors after 2015*
efficiency rate * recover rate electric motors, collection rate electric motors *
efficiency rate * recover rate electric motors
Units: Dmnl

total inner reserve electric motors= INTEG (unused copper scrap electric motors, initial unused
copper in scrap electric motors)
Units: Mg

unused copper scrap electric motors= copper in use electric motors * (1 - reuse electric motors) *
cum. Weibull lifetime 8 years
Units: Mg/Year

used copper scrap electric motors= copper in use electric motors * reuse electric motors *
cum. Weibull lifetime 8 years
Units: Mg/Year

View 6 water installation

collection rate water installation= 0.3
Units: Dmnl

collection rate water installation= 0.3
Units: Dmnl

copper in scrap water installation= INTEG (used copper scrap water installation, initial copper in
scrap water installation)
Units: Mg

copper in use water installation= $\text{INTEG} ((\text{production of copper products} * \text{percentages of copper shares water installation}) - \text{unused copper scrap water installation} - \text{used copper scrap water installation}, \text{initial refined copper water installation})$
Units: Mg

cum. Weibull lifetime 80 years:= $\text{GET XLS DATA} ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C35')$
Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95
Units: Dmnl

initial copper in scrap water installation= 0
Units: Mg

initial refined copper water installation= $\text{initial refined copper} * \text{percentages of copper shares water installation}$
Units: Mg

initial unused copper in scrap water installation= 0
Units: Mg

percentages copper shares after 1990 water installation= 0.13
Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 water installation= 0.14
Units: Dmnl

percentages of copper shares water installation= $\text{IF THEN ELSE} (\text{TIME} > 1990, \text{IF THEN ELSE} (\text{TIME} > 2015, \text{percentages copper shares after 2015 water installation}, \text{percentages copper shares after 1990 water installation}), \text{percentages copper shares before 1990 water installation})$
Units: Dmnl

percentages copper shares after 2015 water installation= 0.13
Units: Dmnl

recover rate water installation= 0.81
Units: Dmnl

reuse water installation= $\text{IF THEN ELSE} (\text{TIME} > 2015, \text{collection rate water installation after 2015} * \text{efficiency rate} * \text{recover rate water installation}, \text{collection rate water installation} * \text{efficiency rate} * \text{recover rate water installation})$
Units: Dmnl

total inner reserve water installation= $\text{INTEG} (\text{unused copper scrap water installation}, \text{initial unused copper in scrap water installation})$
Units: Mg

unused copper scrap water installation= $\text{copper in use water installation} * (1 - \text{reuse water installation}) * \text{cum. Weibull lifetime 80 years}$
Units: Mg/Year

used copper scrap water installation= copper in use water installation * reuse water
 installation * cum. Weibull lifetime 80 years
 Units: Mg/Year

View 7 others

collection rate others= 0.5
 Units: Dmnl

collection rate others= 0.5
 Units: Dmnl

copper in scrap others= INTEG (used copper scrap others, initial copper in scrap others)
 Units: Mg

copper in use others= INTEG ((production of copper products * percentages of copper shares
 others) - unused copper scrap others - used copper scrap others, initial
 refined copper others)
 Units: Mg

cum. Weibull lifetime 10 year:= GET XLS DATA ('Weibull.xls' , 'Weibull' , '2' , 'C13')
 Units: Dmnl

efficiency rate= 0.95
 Units: Dmnl

initial copper in scrap others= 0
 Units: Mg

initial refined copper others= initial refined copper * percentages of copper shares others
 Units: Mg

initial unused copper in scrap others= 0
 Units: Mg

percentages copper shares after 1990 others= 0.35
 Units: Dmnl

percentages copper shares before 1990 others= 0.24
 Units: Dmnl

percentages of copper shares others= IF THEN ELSE (TIME > 1990, IF THEN ELSE (TIME >
 2015, percentages copper shares after 2015 others, percentages copper
 shares after 1990 others), percentages copper shares before 1990 others)
 Units: Dmnl

percentages copper shares after 2015 others= 0.35
 Units: Dmnl

recover rate others= 0.72

Units: Dmnl

reuse others= IF THEN ELSE (TIME > 2015, collection rate others after 2015* efficiency rate* recover rate others, collection rate others * efficiency rate * recover rate others)

Units: Dmnl

total inner reserve others= INTEG (unused copper scrap others, initial unused copper in scrap others)

Units: Mg

unused copper scrap others= copper in use others * (1 - reuse others) * cum. Weibull lifetime 10 year

Units: Mg/Year

used copper scrap others= copper in use others * reuse others * cum. Weibull lifetime 10 year

Units: Mg/Year

View 8 population

least developed - high variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'least developed', 'B', 'D5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

least developed - low variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'least developed', 'B', 'E5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

least developed - medium variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'least developed', 'B', 'F5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

least developed world population=IF THEN ELSE (switch total world population = 1, least developed - high variant, IF THEN ELSE (switch total world population = 2, least developed - medium variant, least developed - low variant))

Units: people

1 = High variant, 2 = Medium variant, 3 = Low variant

less developed - high variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'less developed', 'B', 'D5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

less developed - low variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'less developed', 'B', 'E5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

less developed - medium variant:= GET XLS DATA ('population.xls', 'less developed', 'B', 'F5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

less-developed world population= IF THEN ELSE (switch total world population = 1, less-developed - high variant, IF THEN ELSE (switch total world population = 2, less developed - medium variant, less-developed - low variant))

Units: people

1 = High variant, 2 = Medium variant, 3 = Low variant

more developed -high variant:= GET XLS DATA ('population.xls' , 'more developed' , 'B' , 'D5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

more developed -low variant:= GET XLS DATA ('population.xls' , 'more developed' , 'B' , 'E5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

more developed -medium variant:= GET XLS DATA ('population.xls' , 'more developed' , 'B' , 'F5')

Units: people

http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

more developed world population= IF THEN ELSE (switch total world population = 1, more developed -high variant, IF THEN ELSE (switch total world population = 2, more developed -medium variant , more developed -low variant))

Units: people

1 = High variant, 2 = Medium variant, 3 = Low variant

switch total world population= 2

Units: Dmnl [1,3,1]

1 = High variant, 2 = Medium variant, 3 = Low variant

total world population= least developed world population + less developed world population + more developed world population

Units: people

View 9 demand

GDP growth least developed= (GDP growth rate least developed / 100) * GDP per capita least developed

Units: current USD/(Year*people)

GDP growth less developed= (GDP growth rate less developed / 100) * GDP per capita less developed

Units: current USD/(Year*people)

GDP growth more developed= (GDP growth rate more developed / 100) * GDP per capita more developed

Units: current USD/(Year*people)

GDP growth rate before 2011 least developed= 0.958948

Units: 1/Year

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD.ZG>

GDP growth rate before 2011 less developed= 2.91119

Units: 1/Year

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD.ZG>

GDP growth rate before 2011 more developed= 2.42435

Units: 1/Year

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD.ZG>

GDP growth rate least developed= IF THEN ELSE (TIME - INITIAL TIME > 51, GDP growth rate after 2011 least developed, GDP growth rate before 2011 least developed)
Units: 1/Year

GDP growth rate less developed= IF THEN ELSE (TIME - INITIAL TIME > 51, GDP growth rate after 2011 less developed, GDP growth rate before 2011 less developed)
Units: 1/Year

GDP growth rate more developed=IF THEN ELSE (TIME - INITIAL TIME > 51, GDP growth rate after 2011 more developed, GDP growth rate before 2011 more developed)
Units: 1/Year

GDP growth rate after 2011 least developed= 0.96
Units: 1/Year

GDP growth rate after 2011 less developed= 2.91
Units: 1/Year

GDP growth rate after 2011 more developed= 2.42
Units: 1/Year

GDP per capita least developed= INTEG (GDP growth least developed, initial GDP per capita least developed)
Units: current USD/people

GDP per capita less developed= INTEG (GDP growth less developed, initial GDP per capita less developed)
Units: current USD/people

GDP per capita more developed= INTEG (GDP growth more developed, initial GDP per capita more developed)
Units: current USD/people

GDP world per capita= (GDP per capita least developed * least developed world population + GDP per capita less developed * less developed world population + GDP per capita more developed * more developed world population)/ total world population
Units: current USD/people

GDP world total= GDP per capita least developed * least developed world population + GDP per capita less developed * less developed world population + GDP per capita more developed * more developed world population

Units: current USD

initial GDP per capita least developed= 95.14

Units: current USD/people

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>

initial GDP per capita less developed= 158.2

Units: current USD/people

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>

initial GDP per capita more developed= 1379.44

Units: current USD/people

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>

total copper demand= total world population * total copper demand per capita * uncertainty factor

Units: Mg

total copper demand per capita= $(-1e-011 * (\text{value of GDP per capita})^2) + 7.5e-007 * \text{value of GDP per capita}$

Units: Mg/people

uncertainty factor= 2

Units: Dmnl

value of GDP per capita= GDP world per capita

Units: Dmnl

Anhang 4: Übersicht der modellierten Parameterwerte

Tabelle Anhang-1: Bevölkerungszahlen [Mrd.] und relativer Bevölkerungszuwachs [%] der drei UN-Varianten *hoch*, *mittel* und *niedrig* für 2010, 2050 und 2100 [UN 2012]

Jahr	Variante hoch		Variante mittel		Variante niedrig	
	[Mrd.]	<i>relativer Zuwachs basierend auf 2010</i>	[Mrd.]	<i>relativer Zuwachs basierend auf 2010</i>	[Mrd.]	<i>relativer Zuwachs basierend auf 2010</i>
2010	6,916		6,916		6,916	
2050	10,868	+157 %	9,551	+138 %	8,342	+121 %
2100	16,641	+241 %	10,853	+157 %	6,750	+98 %

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
B	balancing Loops (deutsch: <i>sich ausgleichende Schleifen</i>)
BGR	B undesanstalt für G ewissenschaften und R ohstoffe
BGS	B ritish G eological S urvey
Bio.	Billion
BIP	B ruttoinlands p rodukt (engl.: <i>GDP</i>)
BRIICS	B rasilien, R ussland, I ndien, I ndonesien, C hina und S üdafrika
capita	pro-Kopf
CIS	C ommonwealth of I ndependent S tates: Armenien, Aserbaidshan, Weißrussland, Kasachstan, Kirgisistan, Moldawien, Russland, Tadschikistan, Turkmenistan, Ukraine, Usbekistan
CLD	C ausal L oop D iagramm (deutsch: <i>Wirkungsdiagramm, Wirkungsgraph</i>)
CO ₂	Kohlendioxid
Cu	chemisches Zeichen für Kupfer
d	Tag
DYNAMO	Progammiersprache (D ynamics M odels)
<i>et al.</i>	et alii (und andere)
GDP	G ross d omestic p rodukt (deutsch: <i>BIP</i>)
Gg	Gigagramm = 1.000 Mg = 1 kt
ICA	I nternational C opper A ssociation
ICSG	I nternational C opper S tudy G roup
IIED	I nternational I nstitute for E nvironment and D evelopment
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange
k.A.	keine Angabe
L	Skalierungsparameter, Produktlebensdauer
LIC	l ow i ncome c ountries (deutsch: <i>Länder mit geringem Einkommen</i>)
LME	L ondon M etal E xchange
MFA	M aterial f low a nalysis (deutsch: <i>Materialflussanalyse</i>)
Mg	Megagramm = Tonne (t)
mg	Milligramm
MIC	m iddle i ncome c ountries (deutsch: <i>Länder mit mittlerem Einkommen</i>)
Mio.	Million
MIT	M assachusetts I nstitute of T echnology
Mrd.	Milliarde
OECD	O rganization for E conomic C o-operation and D evelopment
ppm	parts per million (relative Maßangabe)
R	reinforcing Loops (deutsch: <i>selbstverstärkende Schleifen</i>)
RWI	R heinisch- W estfälisches I nstitut für W irtschaftsforschung

SD	S ystem D ynamics
SFA	S ubstance f low a nalysis (deutsch: <i>Stoffflussanalyse</i>)
SFD	S tock and F low D iagram (deutsch: <i>Lager-Fluss-Diagramm</i>)
SO ₂	Schwefeldioxid
SysCu	Modell S ystem Kupfer (Cu)
UN	U nited N ations (deutsch: <i>Vereinte Nationen</i>)
UNDP	U nited N ations D evelopment P rogramme
UNEP	U nited N ations E nvironment P rogramme
USD	US-\$, US-Dollar
USGS	U nited S tates G eological S urvey

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Kupfergebrauch [1.000 Mg bzw. %] nach Ländern und Regionen im Jahr 2009.....	9
Abbildung 1-2:	Entwicklung des jährlichen globalen Kupferangebotes [Mio. Mg] seit 1990.....	10
Abbildung 1-3:	Zeitliche Verschiebung und Vergleich der prozentualen Anwendung der sechs Kupferapplikationen von 1928 und 2006 [nach Angerer <i>et al.</i> 2010].....	11
Abbildung 1-4:	Zusammensetzung der Wiederverwendungsrate (Recyclingquote) aus Sammelquote, Rückgewinnungsrate und Effizienzrate.....	14
Abbildung 1-5:	Historische Entwicklung und Prognose bis 2100 der Weltbevölkerungszahlen [Mrd. Menschen]. Gegenüberstellung der drei UN-Szenarien <i>hohes</i> , <i>geringes</i> und <i>mittleres</i> Bevölkerungswachstum für die drei Länderkategorien <i>kaum entwickelt</i> , <i>wenig entwickelt</i> und <i>entwickelt</i> im Zeitraum von 1960 bis 2100.....	17
Abbildung 1-6:	Zusammenhang zwischen der bisherigen jährlichen Weltbevölkerungszahl [Mrd. Menschen] und der weltweit abgebauten jährlichen Kupfermenge [Mio. Mg] seit 1960.....	18
Abbildung 1-7:	Verlauf der weltweit jährlich abgebauten Kupfermenge [Mio.Mg] in Abhängigkeit von der jährlichen Entwicklung des gesamten BIPs der Welt [Bio. USD] seit 1960 ...	19
Abbildung 1-8:	Nutzungsintensitäts-Hypothese [nach van Vuuren <i>et al.</i> 1999] Entwicklung des Ressourcenverbrauchs in Abhängigkeit des BIPs durch gesellschaftlichem Wandel, Substitution sowie technologischem Fortschritt.....	19
Abbildung 1-9:	Verlauf und Entwicklung des historischen Pro-Kopf-BIPs und des Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] seit 1970 in den 17 der 20 bevölkerungsreichsten Ländern der Welt und die für SysCu verwendete Nachfragekurve.....	20
Abbildung 1-10:	Historische Entwicklung des London-Metall-Exchange-Kupferpreises Cash Grade A (Minimum 99,9935 % Reinheit) in Monaten seit Januar 1960.....	23
Abbildung 2-1:	Schritte und Phasen einer Modellentwicklung (in Anlehnung an Bossel 1994a und Sterman 2000)	35
Abbildung 2-2:	Causal loop-Struktur des Einflusses der Nachfrage auf die Produktion und somit auf die Preisentwicklung.....	37
Abbildung 2-3:	Positiver feedback loop, der zu exponentiellem Bakterienwachstum führt.....	37
Abbildung 2-4:	Beispielanwendung eines SFDs mit modellspezifischen Elementen	38
Abbildung 2-5:	Schematische Darstellung der Reihenfolge der Modellberechnung mit Vensim® in Anlehnung an Wiedemann (2009).....	42
Abbildung 2-6:	Allgemeine Übersicht über SysCu.....	46
Abbildung 2-7:	relative Weibull-Häufigkeitsverteilung der Ausfallquote verschiedener Produktlebenszyklen im zeitlichen Verlauf [Jahre]	49
Abbildung 2-8:	Kumulierte Weibull-Häufigkeitsverteilung der Ausfallquote unterschiedlicher Produktlebenszyklen im Zeitverlauf [Jahre]	50
Abbildung 2-9:	CLD von SysCu.....	52
Abbildung 2-10:	Simplifizierte Darstellung des globalen Kupferangebotes aus dem Primär- und Sekundärstoffkreislauf basierend auf dem Teilmodell <i>use with recycling</i> aus dem Modell SysCu	54

Abbildung 2-11: Vereinfachte Darstellung der Modellierung der Kupferanwendung <i>Automobilsektor</i> unter Berücksichtigung produktspezifischer Charakteristika wie der Produktlebensdauer und der Sammelquote des Teilmodells <i>car</i> des Modells SysCu	57
Abbildung 2-12: Implementierung der UN-Bevölkerungsprognosen durch das Teilmodell <i>population</i> in das Modell SysCu	60
Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der globalen Kupfernachfrage und Wirtschaftswachstum des Teilmodells <i>demand</i> des Modells SysCu	61
Abbildung 3-1: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien des prozentualen Anteils der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in %] nach 2015.....	66
Abbildung 3-2: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien des Produktlebenszyklus der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in Jahren].....	67
Abbildung 3-3: Übersicht der Variabilität der fünf Szenarien der Sammelquote der sechs verschiedenen Kupferapplikationen [in %] nach 2015.....	67
Abbildung 3-4: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 im Szenario <i>Baserun</i>	69
Abbildung 3-5: Verteilung der Bevölkerung nach <i>entwickelten</i> , <i>wenig entwickelten</i> und <i>kaum entwickelten</i> Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante <i>mittel</i>	69
Abbildung 3-6: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Baserun</i>	71
Abbildung 3-7: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Baserun</i>	72
Abbildung 3-8: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] im Szenario <i>Baserun</i>	73
Abbildung 3-9: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Baserun</i>	74
Abbildung 3-10: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios <i>Hohes Wachstum</i>	75
Abbildung 3-11: Verteilung der Bevölkerung nach <i>entwickelten</i> , <i>wenig entwickelten</i> und <i>kaum entwickelten</i> Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante <i>hoch</i>	76
Abbildung 3-12: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	77
Abbildung 3-13: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	78
Abbildung 3-14: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	79
Abbildung 3-15: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers nach Anwendungen in der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	80
Abbildung 3-16: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	81
Abbildung 3-17: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	83
Abbildung 3-18: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	84

Abbildung 3-19: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Konsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	85
Abbildung 3-20: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	86
Abbildung 3-21: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios <i>Pluralismus</i>	87
Abbildung 3-22: Verteilung der Bevölkerung nach <i>entwickelten</i> , <i>wenig entwickelten</i> und <i>kaum entwickelten</i> Ländern für 2010 (innerer Ring), 2050 (mittlerer Ring) und 2100 (äußerer Ring) der UN-Variante <i>niedrig</i>	88
Abbildung 3-23: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Pluralismus</i>	89
Abbildung 3-24: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebots im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Pluralismus</i>	90
Abbildung 3-25: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] im Szenario <i>Pluralismus</i>	91
Abbildung 3-26: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	92
Abbildung 3-27: Anteile der Kupferapplikationen [%] nach 2015 des Szenarios <i>Balance</i>	93
Abbildung 3-28: Entwicklung der Anteile der Kupferanwendungen am Sekundärkupfer von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Balance</i>	94
Abbildung 3-29: Zusammensetzung des modellierten globalen Kupferangebotes im zeitlichen Verlauf von 1960 bis 2100 im Szenario <i>Balance</i>	95
Abbildung 3-30: Entwicklung des weltweiten Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] im Szenario <i>Balance</i>	96
Abbildung 3-31: Verlauf der relativen Zusammensetzung des nicht-recyclten Kupfers in der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Balance</i>	97
Abbildung 4-1: Vergleich der modellierten nachgefragten Kupfermengen nach Szenarien und der Studie des RWI Essen <i>et al.</i> (2005) für das Jahr 2025	104
Abbildung 4-2: Vergleich der Entwicklung des Pro-Kopf-Kupferkonsums [$\text{Mg Cu} \cdot \text{capita}^{-1}$] der fünf Szenarien	105
Abbildung 4-3: Vergleich des globalen Kupferangebotes aus primären und sekundären Ressourcen im Jahr 2050 der fünf Szenarien	108
Abbildung 4-4: Vergleich der Rückführungsquoten von Sekundärkupfer nach Kupferanwendungen ab 2015 der fünf Szenarien	110
Abbildung 4-5: Anteile der Kupferanwendungen in der <i>Stillen Reserve</i> im Jahr 2000	114
Abbildung 4-6: Anteile der Kupferanwendungen in der <i>Stillen Reserve</i> im Jahr 2050 der fünf Szenarien	115
Abbildung Anhang-1: View 1 <i>use with recycling</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen des primären und sekundären Stoffkreislaufs des Kupferangebots	iv
Abbildung Anhang-2: View 2 <i>car</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Automobilsektor</i>	v

Abbildung Anhang-3: View 3 <i>electric motors</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Elektromotoren</i>	vi
Abbildung Anhang-4: View 4 <i>energy transmission</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Energie- und Technologieübertragung</i>	vii
Abbildung Anhang-5: View 5 <i>water installation</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Wasserinstallation</i>	viii
Abbildung Anhang-6: View 6 <i>architecture</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Architektur</i>	ix
Abbildung Anhang-7: View 7 <i>others</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Kupferanwendung <i>Sonstiges</i>	x
Abbildung Anhang-8: View 8 <i>population</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Bevölkerung	xi
Abbildung Anhang-9: View 9 <i>demand</i> des Modells SysCu Modellaufbau und Abbildung der Systemstruktur mit den relevanten Variablen sowie deren Verknüpfungen der Wirtschaftsentwicklung und der globalen Kupfernachfrage in Abhängigkeit der Bevölkerungsentwicklung	xii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Datengrundlage Reserven, Reservebasis und Ressourcen.....	8
Tabelle 1-2:	Segmente der sechs Kupferapplikationen mit Produktbeispielen	10
Tabelle 1-3:	Vergleich von Lebensdauern einzelner Kupferanwendungen bzw. -produkte	13
Tabelle 1-4:	Höhe der Sammelquote, Rückgewinnungsrate, Effizienzrate und Wiederverwendungsrate kategorisiert nach den sechs Kupferapplikationen	15
Tabelle 1-5:	Vergleich der Entwicklung der Metallkonsum-Intensität (Metall pro Einheit BIP) pro Kopf von 1993 und 2005 nach Regionen [$\text{kg} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]	21
Tabelle 2-1:	Vergleich eines analytischen und systemischen Ansatzes	30
Tabelle 2-2:	Übersicht über die Modelleigenschaften von SysCu	45
Tabelle 2-3:	Überblick über die endogenen, exogenen und ausgenommenen Variablen als Modellgrenzen des Modells SysCu	47
Tabelle 3-1:	Übersicht der variierten Modellparameter der fünf verwendeten Szenarien <i>Baserun</i> , <i>Hohes Wachstum</i> , <i>Globale Nachhaltigkeit</i> , <i>Pluralismus</i> und <i>Balance</i>	65
Tabelle 3-2:	Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario <i>Baserun</i>	68
Tabelle 3-3:	Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Baserun</i>	70
Tabelle 3-4:	Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	75
Tabelle 3-5:	Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Hohes Wachstum</i>	76
Tabelle 3-6:	Übersicht der variierten Parameterwerte im Szenario <i>Globale Nachhaltigkeit</i>	81
Tabelle 3-7:	Übersicht der variierten Parameterwerte der Produktlebenszyklen und der Sammelquote ab 2015 im Szenario <i>Pluralismus</i>	87
Tabelle 3-8:	Übersicht der variierten BIP-Wachstumsraten ab 2011 und die Nutzung der <i>Stillen Reserve</i> im Szenario <i>Pluralismus</i>	88
Tabelle 3-9:	Übersicht der variierten Parameterwerte im Szenario <i>Balance</i>	93
Tabelle 4-1:	Übersicht über die Anzahl von dynamischen und statischen Modellen des Rohstoffsystems Kupfer, kategorisiert nach globaler oder regionaler Betrachtungsebene....	98
Tabelle 4-2:	Übersicht über anthropogene Kupferkreisläufe, kategorisiert nach Betrachtungsebene, Zeitraum und statischer bzw. dynamischer Modellierung (in Anlehnung an Chen und Graedel 2012a)	99
Tabelle Anhang-1:	Bevölkerungszahlen [Mrd.] und relativer Bevölkerungszuwachs [%] der drei UN-Varianten <i>hoch</i> , <i>mittel</i> und <i>niedrig</i> für 2010, 2050 und 2100.....	xxvi

Formelverzeichnis

(2-1)	39
(2-2)	40
(2-3)	40
(2-4)	41
(2-5)	41
(2-6)	41
(2-7)	49
(2- 8)	50
(2-9)	54
(2-10)	54
(2-11)	54
(2-12)	55
(2-13)	55
(2-14)	55
(2-15)	55
(2-16)	56
(2-17)	56
(2-18)	56
(2-19)	56
(2-20)	56
(2-21)	57
(2-22)	57
(2-23)	57
(2-24)	58
(2-25)	58
(2-26)	58
(2-27)	59
(2-28)	59
(2-29)	59
(2-30)	59
(2-31)	60
(2-32)	60

(2-33)	61
(2-34)	61
(2-35)	62
(2-36)	62
(2-37)	62
(2-38)	62
(2-39)	62
(2-40)	63
(2-41)	63

Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe.

Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten.

Gießen 2013

Isabelle Gröticke